milhão de unidades. Nesse ano, foram fabricadas as primeiras válvulas de emissão e para rectificação industrial.

Os aperfeiçoamentos principais do tubo electrónico foram: na geometria e número de electrodos intermédios (tétrodo 1923, pêntodo 1925, héptodo 1935) no sentido de melhorar o ganho, o comportamento na frequência, a execução de diversas funções, no do aumento da fiabilidade (melhoria do vácuo através do eléctrodo de vaporização, da soldadura metal-vidro, etc.); no da redução do consumo (introdução do cátodo de aquecimento indirecto com menor trabalho de saída, etc.).

Como resultado da expansão das radiocomunicações, desenvolveu-se também a produção de válvulas de grande potência (~ 100 KW em 1939); introduzem-se em instalações industriais e na tracção eléctrica os tubos rectificadores de gás. O tiratrão (1936) vai permitir a rectificação de potência controlada, e a implantação de numerosos circuitos de comando e de controlo industrial.

— *Válvulas para microondas*

Do ponto de vista da frequência máxima de operação, as válvulas electrónicas, para lá das limitações introduzidas pelas dimensões dos eléctrodos e fios de ligação externos, trabalham no regime de carga espacial. A interacção do fluxo electrónico com o campo eléctrico interno não é directa, dando origem a um atraso de actuação (tempo de trânsito). Sucessivos aperfeiçoamentos na geometria dos eléctrodos (tubos «bolota» 1936, eléctrodos planos 1937) permitiram o funcionamento até cerca de 500-600 MHz.

Os sistemas de propagação guiada, os feixes hertzianos, a radiolocalização, e as comunicações móveis exigiram dispositivos electrónicos para microondas.

Embora se conhecessem meios para a produção laboratorial de oscilações de frequência elevada (faiscadores, oscilador de Barkhausen-Kurz), a primeira solução prática surgiu com o clistrão (Varian e Hansen, 1937); trata-se dum exemplo típico da transformação dum factor limitativo (tempo de trânsito) em causa determinante do funcionamento, fazendo actuar directamente o campo sobre o feixe electrónico (modulação de velocidade).

A interacção do feixe electrónico com o campo magnético como mecanismo produtor de oscilações foi prevista muito cedo (Hull 1921, Posthumus 1935) mas a sua concretização prática só foi conseguida pelo esforço de guerra, por Boot e Randall em 1940, com o magnetrão de cavidades, que veio permitir a produção de potências de pico muito elevadas em microondas, para regimes impulsivos, como por exemplo no radar.

Finalmente o tubo de onda progressiva (Kompfner, 1944), põe em jogo a interacção directa do feixe electrónico com a onda electromagnética, para tanto retardada em estruturas especiais. Este dispositivo, cujo desenvolvimento prossegue na actualidade, e que permite obter larguras de faixa e ganhos de potência elevados, é um dos factores determinantes da implantação corrente de sistemas de Telecomunicações em banda larga (transmissão por impulsos, PCM, FM multicanal, etc.) e tem hoje ampla utilização, por exemplo nas comunicações espaciais.

1.2.2.3 — Desenvolvimento da electrónica do estado sólido

— *Dispositivos discretos*

Junções e contactos assimétricos — o emprego de contactos ou junções de condução assimétrica como detectores ou rectificadores é anterior ao das válvulas de vácuo, tendo por exemplo servido a Marconi para as experiências intercontinentais; o detector de galena-ponta metálica data do início do século (Bose, 1901). Contudo, o seu emprego nos receptores de rádio foi posto de parte quando do advento do tríodo, por razões de sensibilidade, estabilidade mecânica e oxidação superficial.

A utilização de junções assimétricas (óxido de cobre, selénio, etc.) fica então limitada à rectificação de pequena e média potência em unidades de alimentação ou aparelhagem de medida, e a um emprego esporádico como moduladores nos primeiros equipamentos de BLU(SSB) no serviço telefónico e radiotelefónico.

Díodo de germânio de ponta de contacto — As limitações introduzidas pelo fraco ganho e elevado factor de ruído das válvulas electrónicas como amplificadores ou misturadores em microondas levam ao desenvolvimento do díodo de germânio de contacto metálico (Schottky, 1936), que foi o primeiro dispositivo semicondutor a ser produzido industrialmente, durante a II Guerra Mundial. Este tipo de díodo, funcionando como elemento misturador, com um oscilador local a clistrão é, durante mais de vinte anos, o único conversor disponível na prática para receptores de microondas, e como tal é aplicado, em radares, feixes hertzianos telefónicos e de televisão, etc.

O transistor de pontas de contacto e o transistor de junção — Shockley propõe em 1939 a realização dum dispositivo de efeito de campo (i. e. modulação da condutância dum troço de semicondutor por acção do campo eléctrico dum eléctrodo separado de comando). As primeiras tentativas (1945-46) não têm êxito, devido ao efeito de blindagem dos estados superficiais de recombinação do semicondutor. Estabelecidos os princípios fundamentais (teoria da Junção PN, transporte dos portadores de carga por difusão e deriva), ensaios posteriores levam à criação do transistor de pontas de contacto (Bardeen e Brattain, 1947). Pouco depois surge a concepção (Shockley, 1948) e a realização (1951), do transistor de junção bipolar. Este dispositivo caracteriza e vai iniciar a Electrónica da segunda metade do século XX (Microelectrónica). Os progressos obtidos na preparação de cristais de germânio e sobretudo de silício, e na difusão de impurezas (Teal, Little, Buehler e outros, 1951) levam ao início da produção em massa de transistores, ini-

cialmente de germânio e de reduzida fiabilidade; o transistor de silício, superior em grande número de aspectos ao de germânio (exceptua-se o possível comportamento na frequência), começou a ser produzido em 1954 (Texas Instruments), utilizando o processo de liga. A partir de 1962, introduz-se (Fairchild) a tecnologia epitaxial planar de dupla ou tripla difusão superficial. Obtém-se um perfil de impurezas preciso, e parte-se duma técnica fotográfica de implantação, que irá gradualmente permitir a redução dimensional.

Dispositivos de efeito de campo — A concepção destes dispositivos não é recente (p. ex.º Lilienfeld, 1926), mas a sua realização teve de aguardar o desenvolvimento tecnológico motivado pelo transistor bipolar. A teoria do transistor de efeito de campo de junção foi exposta por Shockley e Pearson em 1948, mas só a disponibilidade das técnicas do filme fino conseguiram proporcionar as condições de ordem geométrica e dimensional necessárias à realização dum dispositivo de características interessantes (transcondutância elevada), (Weimer, 1961). Verificou-se que parte destas limitações pode ser contornada fazendo incidir o efeito de campo na modulação da condutividade da camada de inversão, produzida no semicondutor pelo campo eléctrico dum eléctrodo contíguo à superfície e separado dela por um dieléctrico fino (porta ou gate). Esta solução, proposta teoricamente por Ross (1955), levou à realização dos primeiros transistores de metal-óxido de silício (MOS), (Kahng e Attala, 1960), e consequente produção em massa, após ter sido dominado nos processos de fabrico o controlo dos estados superficiais de recombinação no interface silício-óxido de silício, que afectavam a uniformidade das características dos dispositivos. Efectivamente, a concentração destes estados superficiais tem grande influência no valor da tensão de limiar, a partir da qual tem lugar o efeito de campo. De notar que a produção dos transistores MOS é muito mais simples que a do transistor bipolar, envolvendo um menor número de fases de fabrico.

A disponibilidade de compostos semicondutores dos grupos (III — V), (Welker e outros, 1954), como o GaAs, InP, GaSb, etc., veio abrir novas possibilidades aos transistores MOS (MESFETS), especialmente no domínio da frequência.

— *Circuitos integrados*

Introdução — A redução dimensional introduzida pelas estruturas dos transistores bipolares ou de efeito de campo, a sua elevada fiabilidade, e a potência de alimentação reduzida (sem a dissipação de calor no filamento, e $10^4 - 10^6$ vezes inferior à posta em jogo numa válvula electrónica, para a amplificação em sinais fracos, com o mesmo ganho), levaram naturalmente à concepção de estruturas ou circuitos integrados, compostos por diversos transistores e componentes passivos, de forma a proporcionar uma relação funcional específica entre entrada e saída.

Os primeiros circuitos «integrados» empregavam transistores e condensadores discretos com pistas de ligação e resistências obtidas por evaporação em substratos cerâmicos (técnica do filme espesso); as suas dimensões não eram por conseguinte muito reduzidas.

A tecnologia planar veio tornar possível a produção de circuitos integrados monolíticos, em que todos os componentes são obtidos por difusões sucessivas de impurezas, camadas metálicas ou de isolante, a partir dum único substrato semicondutor (Kilby, Lehovec, Noyce, 1959). A fabricação de circuitos integrados bipolares iniciou-se em 1962 (Texas Instruments, Sprague, Fairchild). Tratavam-se de estruturas simples (pares diferenciais, de Darlington, etc.), contendo 3 — 4 transistores de implantação vertical ou lateral, e igual número de resistências integradas.

Circuitos integrados analógicos — os circuitos integrados analógicos ou lineares, têm evoluído para uma integração de média escala (20-50 transistores bipolares ou de efeito de campo, 15-20 resistências ou díodos), uma vez que apotência a dissipar é geralmente elevada (100 mW — 1 W). O comportamento na frequência tem vindo a ser sucessivamente melhorado, atingindo-se cerca de 1 GHz actualmente, para estruturas simples, de construção especial.

Os circuitos analógicos mais correntes são os amplificadores operacionais, de vasto emprego em computação, equipamento de controlo e de medida e aparelhagem de Telecomunicações. No entanto, são frequentes os circuitos para aplicações específicas (por exemplo reguladores, conversores, subsistemas em aparelhagem de rádio e de televisão, etc.). Merecem especial referência os circuitos integrados lineares contendo osciladores comandados por uma tensão (VCO) e os detectores de fase, que, juntamente com a parte digital apropriada (multiplicador ou divisor de relação fixa ou variável), constituem um sistema de captura de fase (PLL), que tem múltiplas aplicações em Telecomunicações.

— *Circuitos integrados digitais*

— *Circuitos bipolares* — O número de circuitos integrados utilizado num sistema digital (de computação, medida, comando ou de telecomunicações) é substancialmente mais elevado que em aplicações lineares. O circuito integrado digital (concentrando operações lógicas simples ou complexas, e elementos de memória), conheceu por conseguinte uma expansão muito rápida; pode dizer-se que, do ponto de vista do mercado, a electrónica actual é predominantemente digital.

A evolução da integração digital bipolar de média escala é representada pelas famílias lógicas RTL, DTL, TTL, etc. Actualmente, são de utilização corrente a lógica saturada TTL normal e de baixa potência e a não saturada Shottky TTL e ECL.

Tomando no sentido do comando pela carga, o produto tempo de atraso × potência dissipada (P. t), como indicador da qualidade do circuito digital, teremos para aquelas famílias: TTL normal 100 pJ, TTL baixa potência 30 pJ Schottky TTL ou ECL cerca de 10-20 pJ.

A complexidade de fabricação, as dificuldades da redução dimensional, sobretudo nas resistências integradas, e o valor relativamente elevado da potência dissipada não permitem estender estas tecnologias à integração em larga escala.

— *Circuitos* LSI *com transistores* MOS — Apesar de limitações no domínio da frequência, os transistores MOS têm, como se referiu, um processo de fabricação simples, apresentam em aplicações digitais um consumo muito pequeno e permitem realizar estruturas integradas com elevada densidade de elementos. Estas propriedades estão na base da extensão da tecnologia MOS à integração em larga ou muito larga escala (LSI ou VLSI), que constituem a motivação principal de todo o progresso recente da Electrónica Digital, por exemplo em microcomputadores, equipamento de medida, comunicações digitais e aplicações de consumo (calculadores, relógios, etc.).

Ao contrário do circuito integrado bipolar típico, a estrutura MOS só contém transistores, que funcionam como elementos de comutação activos, de acoplamento, ou de carga.

Na integração em larga escala, interessa reduzir o produto P. t actuando simultaneamente nos seus dois factores. A redução de potência consumida em regime estático pode efectuar-se recorrendo a estruturas especiais (por exemplo à associação CMOS de Kerwin, Klein, Sarace, 1967), ou diminuindo as correntes de fuga entre source (fonte) e dreno dos dispositivos.

A redução do tempo de atraso implica a redução: das capacidades parasitas, que funcionam no circuito como cargas, na sua maior parte ligadas à metalização da gate; da tensão limiar de condução; das dimensões do transistor elementar, em especial do canal.

A redução das capacidades parasitas pode obter-se: pela construção da gate em silício policristalino (polisil), na chamada «Silicon gate technology», (Faggin e Klein, 1970), ou pela implantação iónica (Crawford, 1972), que oferece a vantagem adicional de combinar transistores MOS de deplecção e de reforço no mesmo circuito. Estas técnicas permitem uma redução cumulativa da tensão limiar, obtendo-se produtos P. t da ordem dos 5-10 pJ.

A redução do canal pode efectuar-se através da técnica da dupla difusão (DMOS, Cauge, Kocsis e outros, 1971), que permite reduzir o comprimento efectivo do canal a 0,5-2 μm com a vantagem de apresentar tensões de disrupção elevadas. Esta propriedade tem interesse na comutação telefónica comandada por microcomputadores, por exemplo. O produto P. t pode atingir neste caso 0,25 pJ.

A tecnologia VMOS (Rodgers e Meindl, 1974) permite obter um canal muito curto, à custa dum processo de fabricação mais complexo. Consiste na abertura dum sulco em V numa deposição NPN, sobre a qual se deposita o óxido (SiO_2) e a metalização (Al) da gate; o comprimento do canal fica determinado pelo corte da região P. Esta estrutura apresenta valores de P. t da ordem dos 2-3 pJ e permite obter densidades elevadas na integração, dada a sua configuração vertical. Apresenta ainda o interesse de se prestar à construção de transistores discretos MOS de potência.

Pode também recorrer-se à redução dimensional completa da estrutura convencional MOS, (SMOS). É hoje possível obter, por exemplo, comprimentos do canal de 0,5 — 1 μm, com uma largura de 5-10 μm, com a correspondente redução das capacidades parasitas. A manutenção das características eléctricas na redução obriga a camadas de óxido muito finas (20-30 nm); obtêm-se assim tempos de atraso da ordem do nanosegundo e produtos P. t menores que 1 pJ; as tensões de atravessamento e de disrupção são neste caso pequenas (5-10 V). A tensão limiar não acompanha a escala de redução, ao mesmo tempo que a entrada na condução da característica de transferência devém pouco nítida. São estes os principais inconvenientes da redução dimensional.

Outras tecnologias recentes permitem uma redução das capacidades parasitas: o processo LOCOS (oxidação local do silício, Appels e Kooi, 1969) nas capacidades resultantes da sobreposição; para diminuir as capacidades em relação ao substrato, recorre-se à difusão sobre substratos isolantes, como a safira (SOS, de Boleky e Meyer, 1972), ou outros materiais (ESFI).

Nestes últimos processos, as correntes de fuga são também reduzidas, o que vai dar origem a um consumo estático muito pequeno, da ordem do nanowatt, com produtos P. t típicos da ordem de 2-3 pJ.

— *Circuitos* LSI *bipolares* — O processo I^2L (integrated injection logic), também referido como MTL, (Hart, Slob, Berger, Wiedmann, 1972) permite a integração LSI ou VLSI de estruturas bipolares: não se trata propriamente de uma nova tecnologia, mas sobretudo de uma nova concepção de circuitos digitais.

Uma célula I^2L consiste na associação dum transistor PNP lateral, que injecta corrente na base dum transistor NPN vertical, com um número de colectores (2-4) requerido pelo circuito digital. Esta célula compacta permite obter uma elevada densidade de integração, idêntica à das células MOS, não inclui quaisquer resistências integradas, e tem um processo de fabricação simples. Como a sua implantação permite reduzir as capacidades parasitas a um mínimo e a variação das tensões entre estados lógicos é pequena (0,5 — 0,7 V), o produto P. t é muito pequeno, da ordem de 0,5-0,8 pJ.

1.2.2.4 — Panorâmica actual — Alguns problemas e limitações fundamentais

— *Introdução*

A panorâmica actual dos dispositivos electrónicos disponíveis ou em desenvolvimento é muito vasta e diversificada. Em vez de uma enumeração a priori incompleta, pareceu mais interessante restringirmo-

-nos à apreciação da evolução, situação presente e limitações fundamentais de dois problemas básicos, e de certo modo complementares, do ponto de vista das aplicações: a amplificação de potência em altas frequências, e o progresso dos circuitos integrados VLSI.

— Amplificação de potência em alta frequência e microondas

— Emprego de válvulas electrónicas — Para obtenção de potências muito elevadas (superiores a 5 KW), até digamos 0,5 GHz, a válvula electrónica de carga espacial (tríodo ou tétrodo) continua a ser a solução preferível do ponto de vista das características limites e do ganho de potência. A construção de válvulas metálicas com isolamento cerâmico, e o aperfeiçoamento dos sistemas de refrigeração permitiram atingir actualmente os 2 MW de potência de saída contínua e modulada por tubo até 30 MHz, com um ganho de potência da ordem dos 15 dB; não parece, pela evolução das Telecomunicações que seja necessário muito mais, a não ser para projectos restritos de natureza experimental, como o aquecimento ionosférico.

Os problemas de projecto ligados à modulação de amplitude convencional fazem com que em potências elevadas se recorra a circuitos de alta eficiência (por exemplo, o modulador Doherty). Por esta razão, as válvulas de alta potência de construção recente são tétrodos.

Nas faixas de UHF e de microondas (bandas C e X), é vantajoso o emprego de clistrões de potência para o regime contínuo até cerca de 5 KW (estações de comunicações com satélites em banda estreita, transmissores de televisão na banda IV, etc.), e de magnetrões para o regime de impulsos, com potências de pico de alguns MW. Tratando-se de dispositivos de baixa eficiência, a potência de saída encontra-se limitada na prática pela dissipação de calor.

Para a amplificação linear em banda larga (feixes hertzianos multicanais, comunicações com satélites) emprega-se o tubo de onda progressiva, capaz de fornecer potências até cerca de 10 KW na saturação, com um rendimento típico de 20-30 %, um ganho de potência elevado (30 dB na banda X), e uma largura de faixa da ordem dos 20 % da frequência central.

A característica de transferência do tubo vai contudo limitar a potência de saída a cerca de 0,1-0,2 da potência saturada, no sentido de se obter um nível de intermodulação reduzido. Escolhe-se por exemplo o ponto de compressão do ganho a −1 dB, ou outros critérios baseados no tempo de atraso, ou na conversão AM-PM tolerada pelo sistema. Outro inconveniente deste dispositivo é necessitar duma tensão elevada de alimentação (3-5 KV), cujo fornecimento é frequentemente menos fiável que o da válvula em si.

—Transistores bipolares e de efeito de campo

A amplificação de potência em frequências elevadas por dispositivos de estado sólido, possível em termos práticos a partir de meados da década de sessenta, veio modificar completamente a filosofia de projecto na generalidade dos equipamentos de telecomunicações.

Pode considerar-se que, para os transistores bipolares actuais até 100-200 MHz, os efeitos de alto nível (desfocalização do emissor, alargamento da base), e as características de disrupção e de dissipação de potência limitam, de forma predominante, o ganho de potência, a eficiência e a potência de saída.

Os efeitos de alto nível são minimizados pela adopção de geometrias específicas («overlay», interdigital, matricial, etc.) que garantam uma relação perímetro/área do emissor o mais elevada possível; recorre-se também à ligação, numa mesma embalagem, de diversos transistores elementares em paralelo.

A estabilização da corrente do emissor, e a limitação de corrente na disrupção podem conseguir-se, na faixa de HF, mediante a inserção na estrutura do transistor de resistências de balastro integradas de baixo valor, em série com o emissor e com o colector. Neste caso, o transistor pode suportar qualquer regime de desadaptação na carga; dentro das características limites, a potência de saída vem limitada pela resistência térmica da embalagem.

Dispõem-se hoje em dia de transistores capazes de fornecer em regime de amplificação linear, potências de pico da ordem dos 200-300 W até cerca de 200 MHz, com um ganho de potência de 10-15 dB, não sendo de esperar que estes limites venham a ser ultrapassados, pelo menos a curto prazo. Para potências de saída até digamos 1-2 KW, pode recorrer-se à combinação de blocos amplificadores, se bem que as unidades de acoplamento sejam de projecto delicado, sobretudo em banda larga.

Dentro destes limites, a utilização de transistores apresenta um rendimento e uma fiabilidade superiores aos das válvulas electrónicas.

Para frequências superiores a 200 MHz, o comportamento dos transistores está principalmente limitado pelo ganho de potência. No sentido de aumentar a largura de faixa útil, recorre-se a embalagens específicas, à redução dimensional e a geometrias especiais, que exigem um controlo de processos de fabricação preciso; resultam daqui um estreitamento das características limites e uma diminuição da fiabilidade, que restringem na prática a frequência máxima de operação e a potência de saída. A simulação de processos e de circuitos em computador é assim particularmente importante no desenvolvimento e no projecto de transistores em microondas.

Conseguem-se à data os seguintes resultados, referentes à amplificação em banda larga: 200 W contínuos ou 500 W de pico em regime impulsivo até 200 MHz; 20 W a 1 GHz; 5 W a 4 GHz e 1 W a 10 GHz. O transistor bipolar substitui assim com vantagem

o tubo de onda progressiva em feixes de média capacidade na banda C.

As potências de saída que se podem obter com transistores de efeito de campo de junção são contudo muito pequenas, uma vez que a geometria convencional do canal estabelece condições limites muito mais restritas que as dos dispositivos bipolares. Em aplicações de sinais fracos, o transistor MESFET permite atingir frequências de transição da ordem de 80-90 GHz, com um ganho de potência de 6 dB, e um factor de ruído pequeno (4 dB a 10 GHz). No entanto, estes dispositivos não se encontram ainda disponíveis correntemente.

Os transistores VMOS, já referidos, permitem obter potências de saída de 10-30 W até 200 MHz. Um tipo de utilização corrente fornece 20 W a 200 MHz, com um ganho de potência típico de 18 dB. É de esperar neste campo um progresso importante a curto prazo.

— Comportamento na frequência de transistores bipolares e de efeito de campo — limites fundamentais

Podemos resumir o princípio de funcionamento destes dispositivos de comando pela carga, na comunicação de energia aos portadores de carga durante um certo intervalo de tempo pelo campo eléctrico. Os limites fundamentais de operação devem por conseguinte depender deste tipo de comando. Assim, o campo eléctrico está superiormente limitado pela tensão de disrupção no semicondutor, e a energia adquirida pelos portadores de carga pela saturação da velocidade de deriva; por outro lado, o tempo de actuação do campo estabelece um limite superior no domínio da frequência.

Com base nestes princípios pode estabelecer-se (Early e Johnson, 1965) um valor limite para o produto do valor da tensão aplicada pela frequência de transição igual a 2×10^{11} Vs^{-1} para o silício. A partir desta limitação fundamental, podem estabelecer-se limites para a corrente, ganho de potência e potência de saída em função da frequência.

Note-se que estes valores extremos nunca são atingidos pelos dispositivos reais devido a outras limitações não fundamentais de per si, como a dissipação de potência, segunda disrupção, decréscimo do ganho de corrente e da frequência de transição devido a efeitos de alto nível, e considerações geométricas ligadas ao desenho e implantação da estrutura.

Por exemplo, num transistor bipolar, o valor mínimo para a tensão aplicada à junção colector-base em regime directo não deve ser inferior a digamos, 1 V. Para esta tensão, a frequência de transição vem igual a 200 GHz. Contudo, as limitações de ordem geométrica na implantação permitem atingir apenas 1/10 daquele valor, ou seja 20 GHz; para esta frequência a espessura da base deve ser da ordem de 0,1 μm, dificilmente atingível, mesmo com os progressos mais recentes na redução e implantação.

Da panorâmica dos dispositivos de potência actualmente disponíveis, podem tirar-se as seguintes conclusões:

— os tiristores, embora limitados no domínio da frequência, são os dispositivos de comando pela carga mais perto do limite teórico da corrente em função da frequência;

— para os transistores bipolares de silício, os dispositivos construídos com uma relação perímetro/ /área máxima no emissor, ou com diversos emissores em paralelo, encontram-se mais perto daquele limite;

— o transistor de junção bipolar apresenta geralmente maior ganho de potência que um transistor de efeito de campo, para a mesma frequência e iguais valores da frequência de transição;

— o transistor de efeito de campo apresenta uma gama dinâmica superior à do transistor bipolar, e por conseguinte, menor taxa de intermodulação em igualdade de circunstâncias.

— Dispositivos de dois terminais

Para a operação em microondas ($f > 1$ GHz), é vantajoso o emprego de dispositivos de dois terminais como osciladores ou amplificadores de condutância incremental negativa; o tempo de trânsito associado é muito curto, e os elementos parasitas ligados à embalagem e à instalação do dispositivo são muito pequenos.

O díodo de túnel (Esaki, 1957), com princípios de operação bem conhecidos, utiliza-se como amplificador de sinais fracos com baixo factor de ruído especialmente quando as disponibilidades de alimentação são limitadas (como nos satélites de comunicações). Emprega-se também em circuitos de comutação muito rápida, como os sistemas de amostragem, etc.

Alguns compostos dos grupos (III-V), a que se já fez referência, como o GaAs apresentam uma mobilidade incremental negativa para valores do campo eléctrico superiores a um dado limiar. Na exploração deste efeito, empregam-se (díodo de Gunn, 1964) estruturas N^+NN^+ submetidas a tensões suficientemente elevadas para que o campo, na maior parte da zona intermédia, seja superior ao valor limiar. Mostra-se que nestas condições se forma uma concentração de carga espacial que se propaga ao longo do corpo da estrutura. A condutância incremental negativa resulta numa constante de propagação com parte real positiva para aquela carga, que se vai portanto propagar com amplificação (efeito de Gunn propriamente dito). Nestas circunstâncias, o funcionamento do dispositivo pode ser instável. Para uma operação estável, a injecção de carga espacial deve encontrar-se limitada, ou o produto concentração da região $N \times$ comprimento tem de ser inferior a um dado valor.

Um díodo de Gunn típico como oscilador na banda X (10 GHz) apresenta uma eficiência de 3-5 % e uma potência de saída de 50-500 mW.

Para o regime impulsivo, podem obter-se 100 W de potência de pico.

A relativamente baixa tensão de alimentação des-

tes dispositivos (8-15 V para o campo limiar) torna-os de aplicação atraente em equipamentos portáteis ou móveis (aparelhagem portátil de feixes, radares de Doppler, etc.).

Deve referir-se que nestes díodos, a conversão de energia tem lugar no corpo do semicondutor, numa zona mais ou menos extensa, ao contrário dos dispositivos bipolares, que a circunscrevem às junções. Pode portanto antecipar-se, do ponto de vista teórico, potências muito elevadas em regime impulsivo.

O díodo IMPATT (impact avalanche transit time), (B. de Loach, Johnston, Cohen, 1965), faz intervir o trânsito de electrões em estruturas $P^+ N N^+$ ou MNN^+ (díodos semicondutores), inversamente polarizadas, empregando-se por exemplo o GaAs ou InP. A injecção de portadores por avalanche tem lugar na zona onde o campo eléctrico é mais elevado; a resistência incremental negativa resultante encontra-se exclusivamente ligada àquele mecanismo. Os díodos IMPATT apresentam uma largura de faixa um pouco mais estreita que a dos díodos de Gunn, mas permitem obter na prática frequências mais elevadas com melhor rendimento. Por exemplo, um oscilador típico de avalanche de GaAs na banda X fornece em contínuo de 500 mW a 10 W de saída com uma eficiência à roda de 15-20 %, sendo possíveis valores mais elevados empregando por exemplo o InP como material semicondutor. Outros valores típicos são 5 W a 15 GHz, 800 mW a 35 GHz, 50 mW a 100 GHz, e 1 mW a 300 GHz (1976). A tensão de alimentação é mais elevada que no díodo de Gunn, uma vez que a polarização é inversa (40-200 V).

Referem-se também os díodos TRAPATT (trapped plasma transit time), que permitem obter rendimentos superiores aos díodos IMPATT, não servindo contudo para a amplificação linear. Os díodos BARITT (barrier injection transit time) são dispositivos de pequena potência e de fraco rendimento, sobretudo empregues na amplificação de baixo nível em banda estreita.

Do ponto de vista da amplificação linear, os díodos de Gunn e os IMPATT apresentam a maior linearidade e largura de faixa. No que respeita ao factor de ruído, obtém-se 15-20 dB para os díodos de Gunn (banda X), 40 dB para o IMPATT, 7-9 dB para o BARITT. Note-se que os amplificadores com dispositivos de dois terminais apresentam o inconveniente genérico da necessidade dum circulador.

— *Integração em larga escala. Panorâmica actual e limitações fundamentais*

— *Panorâmica actual*

A integração em larga escala encontra-se subordinada, na sua quase totalidade à realização de elementos para microcomputadores, memórias, e circuitos específicos de controlo e de medida. As aplicações directas em circuitos de telecomunicações incidem sobre uma área mais restrita (sintetizadores, PLL, modems, etc.) e ocorrem em muito menor quantidade.

Contudo, na primeira metade de 1977, a taxa de crescimento das aplicações lineares tem vindo a aumentar em relação a igual período de 1976, em parte devido ao alargamento de estações terminais, dos equipamentos de feixes, e da nova aparelhagem de telecomunicações civil e militar, e de consumo.

A tecnologia clássica geralmente empregue é a MOS, P, N ou complementar, com dimensões mínimas de 10 μm, mais frequentemente 5 μm. No entanto, as tecnologias I^2L e SOS estão a implantar-se rapidamente nas áreas de memórias RAM dinâmicas e estáticas de pequena capacidade.

Como exemplos recentes de dispositivos LSI disponíveis em 1977-78, temos a memória N-MOS RAM dinâmica de 16 Kb (Intel), que apresenta um tempo de acesso de 200-400 ns, para uma potência dissipada da ordem de 500-800 mW. A primeira memória dinâmica I^2L de 4 Kb (Fairchild) apresenta valores de 90 ns e de 500 mW, respectivamente.

A primeira memória I^2L estatica (Texas Instruments) possui características semelhantes. Estes valores ultrapassam os obtidos na tecnologia MOS clássica para a mesma capacidade; espera-se que nos dois próximos anos seja possível dispor de memórias I^2L de 16 Kb e de SOS de 4 Kb.

— *Limitações fundamentais*

Um dos problemas de maior interesse em Microelectrónica é a determinação dum limite superior para a integração em larga escala, pelo menos empregando tecnologias actuais (MOS e I^2L).

Este limite é função de dois factores distintos: a densidade máxima de dispositivos, e a complexidade máxima do circuito, dependente da densidade, número e natureza das interligações, das suas dimensões máximas, etc.

A densidade máxima depende das propriedades dos materiais, dos processos de fabricação, e da operação do circuito (sobretudo a dissipação de potência). Tendo em conta estas limitações, parece ser possível, para um transistor de junção bipolar, atingir a dimensão mínima de 0,1 μm para a largura das regiões da base, do emissor, e do colector.

Considerando uma estrutura quadrada, e tendo em conta a área mínima para a dissipação de calor, chega-se a uma área mínima de 2 μm^2 incluindo isolamento e contactos; atingir-se-á assim uma densidade máxima de 5×10^7 transistores bipolares por cm^2, cerca de 10^3 vezes a actual, em que as dimensões mínimas são de 5 μm devido aos processos de fabrico.

Para transistores de efeito de campo MOS, a dimensão mínima do canal obtida por redução de escala (SMOS), já referida, parece ser de 0,2 μm, correspondente a tensões mínimas de alimentação da ordem dos 0,5 — 1 V.

Consideremos, para comparação, as dimensões dum circuito LSI MOS actual: por exemplo, na memória INTEL dinâmica de 16 Kb RAM já referida,

cada célula de dois transistores, com as dimensões mínimas de 5 μm ocupa cerca de 500 μm^2 ou seja, 250 μm^2 para cada transistor.

Tendo em conta a dimensão limite de 0,2 μm, obtém-se um factor de redução de 25, ou seja, de 625 em relação à área, que será assim de 0,4 μm^2 no limite; a densidade máxima será de $2{,}5 \times 10$ transistores por cm^2.

A complexidade do circuito apresenta por exemplo como factores limitativos: o atraso de propagação nos dispositivos e pistas internas de ligação, que são equivalentes a linhas de transmissão RC; a máxima densidade de corrente, limitada nos metais a 10^6 A cm^{-2} pela electromigração; a queda de tensão de alimentação e de sinal nas pistas; a dissipação de calor, etc.

Todos estes factores introduzem soluções de compromisso entre a máxima frequência de operação, e o número máximo de dispositivos na estrutura.

Alguns deles, como a queda de tensão interna, podem ser minimizados pela operação a baixa temperatura (77°K por exemplo, Rideout 1976, com abaixamento da tensão limiar); a dissipação de calor pode aumentar-se através da circulação líquida (até 20 W cm^{-2}), etc.

Considerando para as dimensões mínimas dos dispositivos as indicadas, para as pistas de interligações, de alumínio, as dimensões de 0,2 μm $\times$ 0,2 μm e para a camada de SiO_2 a espessura mínima de 0,1 μm, a exploração cumulativa daquelas soluções de compromisso (Widmann, 1977) permite concluir que a densidade de integração pode efectivamente ser aumentada de 10^3 em relação aos valores actuais. Se tomarmos como área máxima da estrutura VLSI um substrato de 7 $\times$ 7 cm ($\sim$ 50 cm^2), numa bolacha de 4 polegadas de diâmetro, o número total de componentes é no limite de cerca de 10^{10}, 10^5 vezes superior ao número actual.

Arbitrando contudo uma queda de tensão interna de 100 mV, e tendo em conta o valor máximo da densidade de corrente nas pistas, obtém-se para aquele circuito uma frequência máxima de operação de 100 KHz.

Para frequências superiores, o número de dispositivos na estrutura diminui proporcionalmente. Para o limite de 100 GHz, estabelecido pelo tempo de trânsito nos transistores, a electromigração limita o seu número a 10.

Supondo ser possível um produto P. t de 0,1 pJ ou inferior, teremos assim atingido, em baixas frequências, o produto P. t e a densidade dos neurónios (0,1pJ e 10^{10} cm^{-3}, respectivamente).

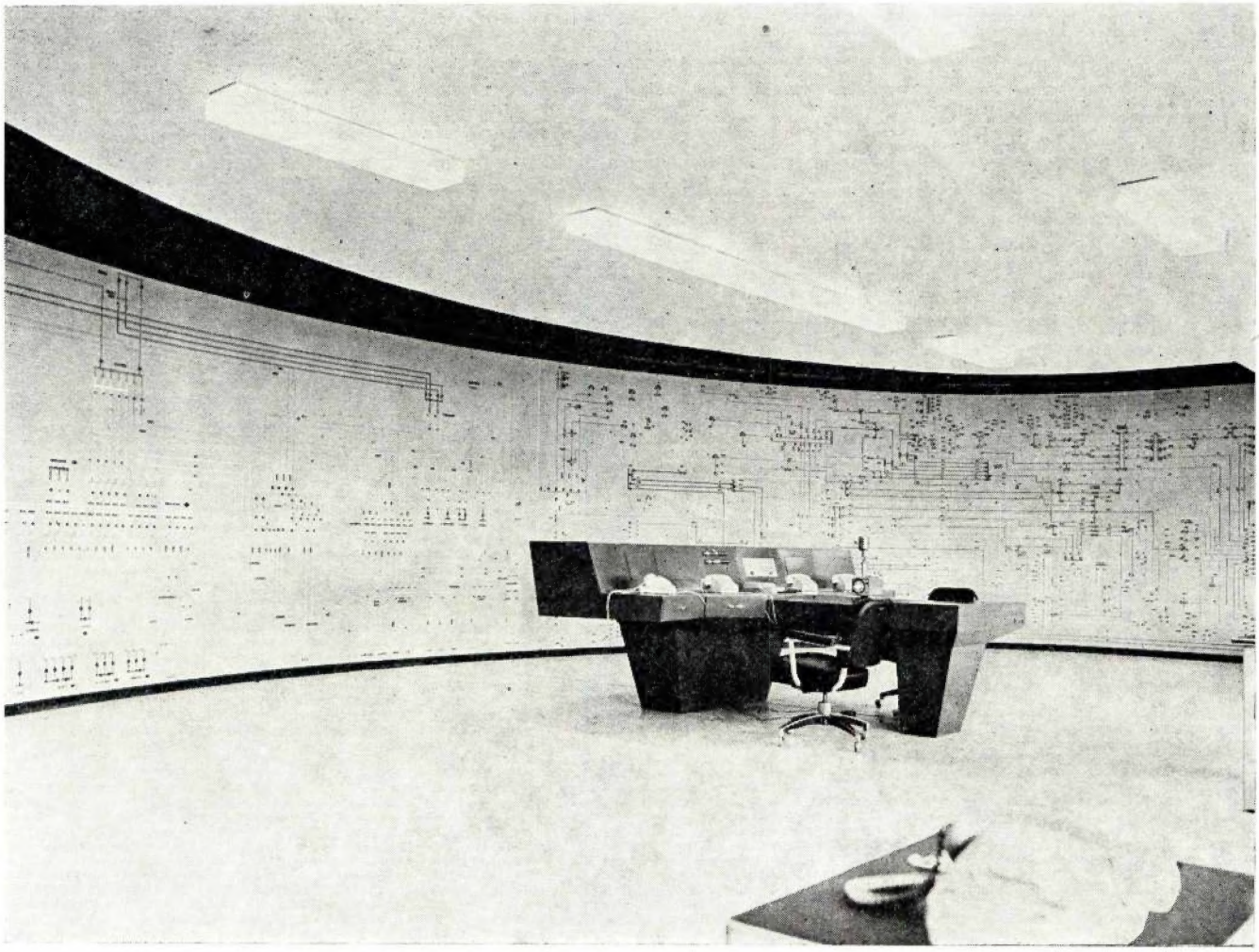
Considerando que o ritmo actual da redução dimensional (de 10 μm para 5 μm em 1970-75) se mantém, os números acima serão atingidos no final do século.

Se assim acontecer, terá talvez interesse caracterizar o progresso da electrónica nos seus primeiros cem anos pelo grau de integração realizado: o volume dum dos primeiros tríodos (120 cm^3) poderá ser ocupado por 50 estruturas VLSI com um total de 50×10^{10} componentes, cada um deles funcionalmente equivalente àquela válvula.

(Continua no próximo número)

EFACEC

estudo
projecto e realização
de instalações eléctricas



EFACEC A MAIOR ORGANIZAÇÃO DO PAÍS NO RAMO ELECTROTÉCNICO

C. D. U. 665.51/58

PETROQUÍMICA

LUÍS L. RAMALHETE (*)

Num simpósio sobre financiamento de projectos recentemente realizado em Londres, um dos «speakers» dividiu os países em três categorias:

— Países subdesenvolvidos
— Países intermédios
— Países com petróleo

Esta classificação pode, neste momento, ter certas características anedóticas mas não estará muito longe da verdade dentro dos próximos anos e dá uma ideia da importância dos produtos petrolíferos.

Depois do aumento espectacular do seu preço, provocado pelos países da OPEC manifestando a intenção de continuar a manter, de futuro, uma política de aumento progressivo, o petróleo passou a ser o produto mais ambicionado para qualquer país.

Na realidade, a produção de energia está, na próxima década, muito intimamente ligada ao petróleo já que as restantes formas de produção de energia ou o não podem substituir a curto prazo, por não serem ainda competitivas em preço, como o carvão, ou ainda levantam problemas laterais, como a energia nuclear, ou não estão ainda tecnicamente resolvidos, como a energia eólica, etc. Por outro lado, o petróleo é a matéria-prima básica para produtos que contam entre os mais importantes da civilização moderna, especificamente as matérias plásticas e as fibras sintéticas e, de uma forma geral, os produtos petroquímicos.

Devido à importância cada vez maior destes produtos que, no entanto, consomem menos de 5 % do petróleo mundial, verifica-se uma tendência para a sua quota aumentar cada vez mais.

Esta tendência já neste momento se faz sentir no panorama industrial. Efectivamente a produção da principal matéria-prima petroquímica, o etileno, está a crescer a um ritmo superior ao do crescimento da produção de energia.

A consequência do referido será, pois, que, no contexto do petróleo, os produtos petroquímicos se tornem cada vez mais importantes e que os seus principais utilizadores actuais, os combustíveis, percam progressivamente terreno.

De futuro não será lógico que se queime um produto tão importante como o petróleo.

A indústria petroquímica, ou seja, a indústria dos derivados do petróleo, teve a sua origem nos Estados Unidos onde a refinação de petróleo tem já mais de cem anos de história. A indústria petroquímica é, no entanto, mais recente e o seu desenvolvimento verificou-se principalmente após a última guerra mundial. O impulso fundamental à sua evolução foi dado pelo aperfeiçoamento das técnicas de «cracking» mas as principais tecnologias de síntese de polímeros nasceram na Europa.

Se bem que a produção técnica de vários polímeros sintéticos tenha começado bastante cedo (nomeadamente de PVC, de poliestireno, de poliamidas, de polimetilmetacrilato e de vários policondensados) a produção à escala industrial do mais importante dos polímeros, o polietileno, só teve início em 1939. A sua descoberta tinha sido feita acidentalmente em 1932 por GIBSON e FAUCET em Inglaterra e a primeira unidade produzia cerca de 50 toneladas por ano de produto, alimentada por etileno derivado da fermentação do álcool. Neste momento, a produção de polietileno de baixa densidade atinge cinco milhões de toneladas. Em 30 anos o produto passou de uma simples curiosidade a um produto de grande consumo.

Os anos que se seguiram à última guerra mundial viram surgir sucessivamente o politetrafluoretileno, os poliesteres, os copolímeros SAN e ABS, o polietileno de alta densidade, os policarbonetos, o polipropileno e, já na década dos anos 60, o poli-(óxido de fenileno), as polisulfonas, os copolímeros ASA, etc.: muitas dezenas de produtos com características diferentes e adaptáveis às mais variadas exigências da tecnologia moderna.

Desde 1950 o uso dos polímeros sintéticos cresceu a um ritmo explosivo. A produção mundial estimada em 1 milhão de toneladas em 1948 atingiu 27 milhões em 1969.

Após a crise do petróleo, o ritmo de crescimento dos principais produtos petroquímicos abrandou, mas os plásticos continuam a caminhar a passadas largas para posição de principal matéria-prima de transfor-

(*) Engenheiro Químico, Companhia Nacional de Petroquímica.
Relato 1 do Tema 5 — Congresso da Ordem dos Engenheiros, Lisboa, Novembro de 1977.

mação e espera-se que no final da década de 80 o seu consumo em volume ultrapasse o do ferro.

Muitas dúvidas foram levantadas inicialmente acerca do efeito do aumento dos preços na competitividade dos plásticos. Os estudos realizados ulteriormente [15] demonstraram que, devido à excelente posição destes produtos em relação às restantes matérias-primas no que se refere ao consumo de energia por unidade de volume, a sua competividade não é afectada (16).

O Dr. Hans Georg Elias, professor da Universidade Técnica de Michigan [6], refere que os gritos de «voltemos aos bons velhos tempos», ou melhor, «voltemos às boas matérias-primas tradicionais» omitem alguns factos importantes, nomeadamente que a substituição dos produtos sintéticos por produtos naturais exige grande disponibilidade de terras férteis, já tão escassas para a produção de alimentos. Tal é o caso da madeira e da celulose. A substituição das fibras sintéticas, actualmente utilizadas, por algodão implicaria uma área adicional de cultura de cerca de 25 milhões de quilómetros quadrados. O aumento da produção de lã exigiria igualmente grandes disponibilidades de terrenos de pastagem (será ocasião de abrir um parêntesis para lembrar aos especialistas do meio ambiente a acção destruidora da natureza, de que aliás os países mediterrâneos são bons exemplos, das cabras e carneiros, principais produtores de lã). Também a produção de coiro não pode ser aumentada sem multiplicar o número de bovídeos e, portanto, as zonas de pastagens. Foi calculado por técnicos do cauchu natural que a produção deste produto não poderia cobrir mais de 40 % das necessidades mundiais de borracha e o metal e o vidro necessitam de mais energia para a sua produção que os plásticos.

Também no caso dos metais se prevê um aceleramento da substituição destes produtos por matérias plásticas, sendo as principais razões as seguintes:

— Limitações de existências para alguns metais.
— Preço por volume mais baixo nos polímeros que nos metais.
— Custo de energia para a produção de polímeros mais baixa que para a dos metais, especialmente numa base de volume.
— Melhores características para aplicações específicas.

Vários especialistas prevêem, assim, um aumento anual médio mundial do consumo dos plásticos, na próxima década, de cerca de 9 %, com a capitação média mundial a subir de 11 kg nos anos de 72/74 para 34 a 35 kg em 1990 [7] [14], esperando que a maior penetração se dê nos próximos anos nos mercados da madeira, do papel, do vidro e dos metais [3].

Uma das razões que justificam um crescimento importante dos plásticos nos próximos anos é a previsão do aparecimento destes produtos como um material básico de engenharia [15]. O crescimento verificar-se-á devido aos custos crescentes da energia que os porá em posição cada vez melhor para competir com os metais, em especial no caso dos chamados «engineering thermoplastics», nomeadamente o acetal, o nylon, o polibutileno tereftalato, o poli-(óxido de fenileno) modificado, o poli-(sulfureto de fenileno), o policarbonato, a polisulfona [2].

No entanto, apesar do aparecimento e desenvolvimento de produtos específicos, os cinco plásticos principais — polietileno de baixa densidade, polietileno de alta densidade, polipropileno, poli-(cloreto de vinilo) e poliestireno e copolímeros — continuarão a preencher cerca de 95 % da produção de termoplásticos. Isto significa também que os hidrocarbonetos não perderão a sua posição como matéria-prima principal para a fabricação de polímeros sintéticos, durante as próximas décadas [6].

Apesar do pessimismo e do receio existente nalguns meios, a indústria petroquímica mundial está de novo em marcha para um novo período de avultados investimentos. Os investimentos dos próximos anos ultrapassarão certamente quaisquer outros, feitos em anteriores períodos de desenvolvimento industrial. A principal diferença será de que, no passado, os investimentos eram realizados com o único fito de acompanhar o crescimento da procura ao passo que os novos objectivos são os de obter o controlo sobre as matérias-primas fundamentais e sobre os respectivos custos de produção.

*
* *

A indústria petroquímica dá origem a uma série de matérias-primas a partir das quais uma larga gama de produtos de consumo podem ser produzidos: plásticos, fibras sintéticas, borracha sintética, corantes, tintas, produtos farmacêuticos.

É usual diferenciar dois grupos básicos de matérias-primas: etileno e monómeros similares e benzeno e produtos aromáticos similares.

O etileno é hoje o produto químico orgânico fabricado no mundo em maior quantidade. A produção na Europa Ocidental deste produto deverá atingir, em 1977, cerca de 11 milhões de toneladas métricas [12]. A capacidade de produção de etileno de um país é o índice do desenvolvimento local da indústria química orgânica. O etileno é utilizado na produção de cerca de 30 % dos produtos petroquímicos e é um elemento determinante no seu custo já que a obtenção da maioria dos produtos orgânicos está directa ou indirectamente ligada à sua produção [5].

O etileno é produzido por «cracking» de fracções ligeiras do petróleo, em especial da nafta, e a sua produção nas unidades de «steam-cracking» é acompanhada pela de outros monómeros, nomeadamente de propileno e de fracções ricas em butadienos, benzenos, toluenos e xilenos.

Qualquer destas matérias químicas é utilizada para a produção de outros produtos petroquímicos. Cerca de 80 % da produção de produtos químicos orgânicos é utilizada para a preparação de polímeros sintéticos. 75 % do etileno é consumido na produção de plásticos, representando os polietilenos a parte

mais importante do consumo com mais de 50 % do total.

Além dos polietilenos, são também derivados importantes do etileno o poli-(cloreto de vinilo), o estireno, o óxido de etileno, o acetaldeido e o acetato de vinilo.

São ainda intermédios, ou fabricados a partir destes, o dicloroetano, o cloreto de vinilo, o ácido acético, o poli-(acetato de vinilo), o etilbenzeno, o poliestireno, as resinas ABS e SAN, as resinas poliester e as borrachas sintéticas.

A produção de propileno está intimamente ligada à do etileno mas a sua utilização abrange um mercado diferente. Os principais derivados directos do propileno são: o polipropileno, o acrilonitrilo, o óxido de propileno, o isopropanol, o fenol, os álcoois oxo e a glicerina.

Estes produtos entram na fabricação ou resultam da transformação dos seguintes produtos: o propileno glicol, as resinas poliester, os poliuretanos, várias borrachas sintéticas, as resinas ABS e SAN, o cumeno, os fenoplastos, as poliamidas, a acetona, a acetonacianidrina, o metacrilato de metilo, o polimetacrilato, o bisfenol, os policarbonatos, as resinas epoxi, o cloreto de etilo, a epocloridrina, as resinas alquídicas.

Cerca de 50 % da produção do propileno da Europa Ocidental é utilizada em plásticos e 15 % em fibras poliamidas ou acrílicas. É de salientar o rápido aumento de importância de derivados do propileno tais como o acrilonitrilo, o polipropileno e os álcoois oxo em detrimento de mercados como os do cumeno e dos oligomeros [12].

O butadieno é uma das principais matérias-primas para as borrachas sintéticas além de entrar na composição das resinas ABS.

Os principais produtos produzidos a partir do benzeno são o etilbenzeno (produto intermédio do estireno), o fenol e o ciclohexano, este último utilizado na fabricação das matérias-primas do nylon 6.6 (ácido adípico) e do nylon 6 (caprolactama). É ainda utilizado, em boas quantidades, na fabricação de nitrobenzeno, a partir do qual é produzida a anilina, do anidrido maleico, dos alquilbenzenos e dos clorobenzenos. Outros produtos do ramo dos derivados do benzeno são o poliestireno, as borrachas sintéticas, as resinas poliester, as resinas alquídicas, o anidrido ftálico, os fenoplastos, a acetona, a acetacianidrina, o metacrilato de metilo, o poli-(metacrilato de metilo), o bisfenol, os policarbonatos, as resinas epoxi, os isocianatos, os poliuretanos, os alquilbenzenos sulfonatos e diferentes produtos da química fina.

As tendências actuais em relação às unidades de «steam-cracking» visam principalmente o aumento do rendimento em etileno e a utilização de fracções de petróleo mais pesadas, este último objectivo resultante do aumento relativo do preço da nafta e da sua escassez no mercado nos últimos anos.

Os fornos de «cracking» são o principal ponto de actuação, verificando-se uma evolução para tempos de contacto mais reduzidos e para temperaturas mais elevadas. Enquanto que as unidades mais antigas utilizavam tempos de contacto de um segundo e temperaturas superficiais de 870° C, várias firmas surgem agora com fornos trabalhando a temperaturas superiores a 1000° C e tempos de contacto inferiores a 0,1 segundo. Um processo propõe mesmo a injecção de petróleo bruto ou de óleos pesados directamente em vapor a 2000° C com tempos de contacto inferiores a 30 milisegundos. Um outro processo com boas perspectivas procede ao «cracking» em presença de hidrogénio.

O problema da utilização de fracções mais pesadas nos «crackers» não está, no entanto, ainda totalmente resolvido, acarretando maiores dificuldades de funcionamento, assim como menor rendimento e aumento do custo do etileno. Uma solução alternativa do problema estaria nas próprias refinarias que deveriam evoluir para refinarias químicas com produção de maiores quantidades de fracções mais leves através da montagem das necessárias unidades de conversão [5]. Refira-se, por exemplo, que em Espanha, já na previsão de um aumento do consumo de nafta e de baixa do consumo de fuel oil, foi publicado um decreto oferecendo vantagens económicas às refinarias que instalassem «hidrocrackers» para aumentarem a capacidade de produção das fracções ligeiras [11].

A capacidade das unidades de «steam-cracking», que subiu nos últimos anos até cerca de 500 000 toneladas anuais de etileno, parece agora ter estacionado como consequência do aparecimento de problemas de construção, arranque e conservação para capacidades mais elevadas, implicando maiores riscos de exploração. As mais recentes unidades europeias em projecto apresentam capacidades anuais entre 300 000 e 350 000 toneladas de etileno.

De referir ainda, como eventual futura alternativa ao tradicional processo de «cracking» o processo de produção de etileno a partir do metanol.

A produção de polietileno de baixa densidade, o plástico mundialmente mais consumido, continua a utilizar duas alternativas básicas: reactor tubular ou reactor de autoclave. Os principais aperfeiçoamentos têm sido nos reactores, que trabalham a pressões de 1500 a 3000 atmosferas. As capacidades de produção não têm deixado de aumentar e várias linhas de cerca de 100 000 a 150 000 toneladas anuais estão neste momento em construção.

Ao passo que o polietileno de baixa densidade é produzido a altas pressões, o polietileno de alta densidade (produto de densidade superior a 0,94) é preparado em reactores de tipo normal, a baixa pressão. O processo inicial, que utilizava um catalisador de cromo, implicava um tratamento dispendioso para a sua extracção. Actualmente esta tecnologia foi quase totalmente substituída por processos utilizando catalisadores superactivos que, devido às próprias características e quantidades reduzidas utilizadas, podem ser deixados no polímero, sem necessidade de qualquer extracção.

Uma firma pelo menos está a apresentar um novo processo de polimerização de polietileno de alta

densidade em fase gasosa, sobre leito fluidizado. Esta poderá ser a tendência futura de produção de vários polímeros mas neste momento o sua tecnologia não está ainda totalmente dominada.

É de interesse salientar que tanto os produtores de polietileno de baixa densidade como os de alta densidade estão a fazer esforços no sentido de conseguirem produzir o outro tipo de polietileno nas próprias unidades por meio de modificação das condições de funcionamento. Se bem que vários produtos aceitáveis tenham sido obtidos por ambos os lados o problema não está resolvido.

A tecnologia de produção de polipropileno é semelhante à do polietileno de alta densidade e sofreu uma evolução análoga. Várias empresas químicas desenvolveram catalisadores de alta actividade que não necessitam de ser eliminados dos polímeros e que permitem a construção de unidades substancialmente mais baratas. Também no caso do polipropileno uma firma aperfeiçoou um processo de polimerização em fase gasosa que se encontra já a ser comercializado.

Também os processos para a produção de aromáticos têm sofrido uma evolução contínua. Os progressos têm-se verificado principalmente no aperfeiçoamento dos catalisadores de reforming, no aumento da severidade das condições de reforming e na melhoria dos processos de extracção dos aromáticos. De salientar também os novos processos de hidroalquilação e de tranzalquilação actualmente em desenvolvimento.

Não nos alargaremos nos outros processos petroquímicos ou por não terem igual significado nesta indústria ou por serem mais amplamente relatados em trabalhos apresentados a este Congresso.

*
* *

A implantação da indústria petroquímica tem quatro consequências fundamentais sobre a economia de um país (não as procuraremos demonstrar neste relato mas apenas ilustrar com algumas observações e exemplos):

A primeira consequência é a criação de produto nacional bruto. Arthur D. Little Ltd. afirma que os produtos petroquímicos, baseados no etileno, propileno, butadieno, benzeno, tolueno e xileno, produzidos no Texas, são responsáveis pela creação de 13 % do produto nacional bruto americano [4].

Como segunda consequência verifica-se uma forte acção compensadora da balança de pagamentos. Na realidade, sendo o petróleo um produto essencial à economia de qualquer país, parece que a forma mais lógica de cobrir as divisas dispendidas pela sua importação a um preço P será de o transformar e de exportar os produtos resultantes a um preço NxP. Estando neste momento a importar-se anualmente milhões de contos de plástico totalmente fabricado no estrangeiro, de futuro as matérias plásticas fabricadas em Portugal terão cerca de 50 % de incorporação de serviços e mão-de-obra nacionais. Isto é consequência dos plásticos serem produtos de terceira ou quarta geração na cadeia petróleo-nafta-monómeros-polímeros em que a incorporação de serviços nacionais se vai adicionando sucessivamente.

Em terceiro lugar, de ordem mas não de importância, verifica-se uma acção multiplicadora da indústria e do emprego. A primeira fase do complexo petroquímico de olefinas a instalar em Sines dará, por exemplo, origem anualmente à utilização da indústria metalomecânica nacional em trabalhos no valor de mais de quatrocentos mil contos, ao transporte de cinquenta milhões de toneladas × quilómetros de produtos sólidos e à fabricação de cerca de nove milhões de sacos. Sob o ponto de vista de emprego, verifica-se que, apesar de ser uma indústria capital-intensiva, por cada emprego criado directamente dá origem a cinco empregos em serviços relacionados [13]. Ainda Arthur D. Little é de opinião que os produtos petroquímicos anteriormente referidos, desde a produção até ao seu lançamento no mercado retalhista, dão origem, nos Estados Unidos, a três milhões de empregos [4]. Esperamos que, em Portugal, este número atinja, dentro de um par de anos, 50 000 empregos, tendo em consideração as indústrias de produção de produtos petroquímicos, de produção de fibras sintéticas derivadas, de transformação de matérias plásticas e afins, de construção de máquinas e de fabricação de moldes para a indústria de plásticos, assim como os exportadores/importadores e vendedores de produtos petroquímicos.

Finalmente, a quarta consequência da implantação da indústria petroquímica é a obtenção da independência do país no abastecimento de matérias-primas básicas. As exportações dos produtos petroquímicos desenvolvem-se com uma taxa de crescimento superior à da própria indústria, o que significa que cada vez mais se transformará numa indústria de características internacionais. Isto implica a necessidade de, mesmo em países pequenos e não integrados em comunidades económicas, ela ser adaptada às técnicas e às dimensões internacionais. Sendo essencialmente baseada, cada vez mais, numa economia de escala, a indústria petroquímica tende mais tarde ou mais cedo para competições oligopolísticas [8] e os pequenos países que não conseguirem a tempo a sua independência neste campo ficarão completamente dependentes dos grandes grupos industriais mundiais.

*
* *

Portugal parece ter conseguido ultrapassar a «barreira petroquímica» pois, em meados de 1979, deverá pôr em funcionamento, no complexo de Sines, o seu primeiro «steam-cracker» com uma capacidade anual de 300 000 toneladas de etileno.

Apraz-nos verificar que a oportunidade e o dimensionamento da indústria petroquímica portuguesa, apesar da crise do petróleo e da recessão económica mundial, têm continuado a justificar-se: uma grande empresa petrolífera internacional que sempre fez reservas à implantação e à dimensão da petroquímica nacional, resolveu recentemente instalar no sul

de França um «steam-cracker» e um conjunto de unidades petroquímicas muito semelhantes às do complexo de olefinas de Sines [9]. Também a BASF informou, em Dezembro de 1976, ter decidido instalar em Ludwigshafen uma unidade de «steam-cracker» com uma capacidade de 300 000 toneladas de etileno por ano [10]. Se bem que a petroquímica nacional não esteja especialmente polarizada para o mercado espanhol, será interessante referir, como exemplo das possibilidades de colocação dos produtos de Sines, que, num relatório publicado pelo Ministério de Assuntos Industriais de Espanha, se previa, para 1980, naquele país deficits de abastecimento de 76 000 toneladas de etileno, 23 000 toneladas de propileno, 120 000 toneladas de estireno e 94 000 toneladas de benzeno.

Até à data, como actividades petroquímicas propriamente ditas, o país apenas pôde contar com algumas pequenas unidades produzindo a partir de matérias-primas importadas ou de origem carboquímica.

Neste momento estão em estudo ou em instalação, além das unidades básicas do «steam-cracker» e BTX, fábricas de polietileno de baixa e alta densidade, polipropileno, cloreto de vinilo, poli-(cloreto de vinilo), acrilonitrilo, butadieno, estireno, poliestireno, borrachas sintéticas, caprolactamas, poliamidas, ácido tereftálico, anidrido ftálico e ftalatos, entre outros.

A situação actual da instalação do complexo petroquímico de olefinas, em Sines, é detalhadamente tratada por um dos trabalhos apresentados a este Congresso. Infelizmente não foi apresentado nenhum trabalho semelhante sobre a petroquímica de aromáticos.

*
* *

O conjunto de trabalhos apresentados neste Congresso sob o tema «Combustíveis e Petroquímica» reflecte um interesse crescente pelos assuntos petroquímicos e um interesse mais reduzido pelos combustíveis, nomeadamente pelos problemas dos combustíveis petrolíferos. Esta posição corresponde, aliás, à tendência mundial de os produtos petroquímicos pesarem cada vez mais na absorção da energia básica mundial.

Apenas três comunicações referem directamente o tema «Combustíveis», uma delas no âmbito do combate à poluição, uma outra, de *Victor Risota*, focando o problema da utilização do gás como combustível para os automóveis, e a terceira, de *Emílio Rosa*, debatendo o problema da implantação da energia nuclear.

É interessante notar que grande parte dos assuntos tratados corresponde a problemas encontrados pelos participantes nas actividades profissionais diárias e a sua apresentação no Congresso significa uma preocupação generalizada de pôr abertamente à discussão e crítica o seu trabalho e as conclusões encontradas.

Um grupo de comunicações cobre, de forma muito vasta, parte da tecnologia petroquímica e a implantação desta indústria em Portugal:

— *João Gomes* historia o lançamento do projecto da petroquímica de olefinas e relata o planeamento dos trabalhos e o seu estado actual de avanço. Pensamos que esta comunicação constitui a mais concreta demonstração da realidade da indústria petroquímica portuguesa.

— Uma hipótese de modelo do complexo petroquímico de Sines, com vista ao seu planeamento económico, é apresentada por *Amado da Silva* e *Aníbal Santos*. Gostaríamos de salientar a forma extremamente construtiva como os autores deste trabalho procuraram dar a sua ajuda a um projecto onde não estão directamente envolvidos, sem se lançarem em críticas destrutivas estéreis.

— *Aquiles Gomes* e *Aníbal Pires* definem uma via para determinação de factores críticos no dimensionamento de unidades petroquímicas. A metodologia proposta para ultrapassar a dificuldade de projecção dos preços petroquímicos é extremamente interessante e, se bem que não elimine a necessidade de preparação de um cálculo de taxa de rentabilidade interna nos moldes tradicionais, especialmente na fase de financiamento do projecto, permite simplificar bastante a análise de complexos químicos.

— O problema da previsão, a longo prazo, dos preços dos produtos petroquímicos surge ainda em comunicação feita por *Luís Ramalhete* e *Jorge Telhada*, numa tentativa para relacionar os preços referidos, tendo em consideração o carácter evolutivo do preço da matéria-prima «petróleo bruto».

— Também num contexto de análise económica, *Luís Ramalhete* estuda através de um sistema expedito, as incidências de carácter macro-económico da instalação do complexo petroquímico em Portugal. São salientadas as condições em que um balanço positivo de divisas é obtido.

— Abordando o planeamento de grandes empreendimentos do tipo do complexo petroquímico de Sines, sob a óptica dos fornecedores e empreiteiros nacionais, *António Jardim* propõe uma solução para maximização de participação nacional.

— *Clemente Nunes* e *Joaquim Nunes Barata* analisam os principais mercados petroquímicos de monómeros da Europa, considerando favoráveis as oportunidades de colocação dos excedentes nos próximos anos. Detalhes sobre outros mercados petroquímicos são ainda apresentados nas várias comunicações a seguir referidas sobre produtos individuais.

— As principais características dos processos de fabricação e as implicações da instalação em Portugal de unidades dos monómeros cloreto de vinilo e acrilonitrilo são analisadas, respectivamente por *Aníbal Pires* e por *Aquiles Gomes* e *Conde Pereira*. Na comunicação de Aníbal Pires é salientado o interesse de individualizar, dentro do esquema geral petroquímico, um «complexo industrial de PVC», onde se focam as incidências, como matérias-primas ou como produtos intermédios, do sal, do cloro e da soda.

— As tecnologias dos polímeros poli-(cloreto de vinilo) e poliestireno são estudadas nos trabalhos de *Jorge Telhada* e de *Norton de Matos* com *Pampulim dos Santos*.

— *José Costa Reis* e *Luís Meira* propõem uma metodologia para a estruturação dos projectos dos laboratórios do complexo petroquímico.

— O tema da poluição é tratado de forma construtiva por *José Manuel Bacharel* e por *Eleutério Morais Barroco* num problema de recuperação de hidrocarbonetos.

— *Conceição Silva* debruça-se sobre o desenvolvimento das indústrias de fibras sintéticas, pondo em destaque a importância do complexo petroquímico de olefinas na sua produção em Portugal, nomeadamente através da fabricação de acrilonitrilo e de polipropileno.

— *Hélder Rodrigues*, depois de considerar a importante necessidade de desenvolver, simultaneamente com a implantação da indústria petroquímica de olefinas, a indústria de transformação de plásticos em Portugal e de preconizar as acções a promover nesse âmbito, expõe, em trabalho de carácter tecnológico, as principais técnicas de transformação de plásticos.

— Finalmente, *Luís Varela Cid* exemplifica a versatilidade das matérias plásticas, descrevendo um processo de niquelagem químico aplicável àqueles produtos.

É de salientar a ausência de comunicações sobre alguns dos processos petroquímicos mais importantes, nomeadamente sobre a produção de etileno e de propileno através da unidade de «steam cracking», extracções de benzeno e produção de estireno a partir das fracções secundárias daquela unidade, assim como sobre a fabricação de polietileno de baixa e alta densidade e de polipropileno.

O mesmo acontece em relação à petroquímica de aromáticos em geral. Este facto verifica-se assim justamente em relação às unidades cujos projectos se encontram já em fase de realização e deve-se seguramente à indisponibilidade, por essa razão, dos responsáveis ou a escrúpulos de confidencialidade em relação aos processos respectivos.

Directa ou indirectamente relacionados com a petroquímica foram apresentados vários trabalhos de carácter científico:

— *Jorge Telhada* estuda o efeito catalítico do ião arsenito na depuração do anidrido carbónico.

— As operações de transferência de massa resultantes de um contacto gás-líquido são analisadas por *Augusto Medina* e *Manuel Jerónimo*, que salientam diversos aspectos fundamentais do seu tratamento teórico.

— *Alírio Rodrigues* e *José Figueiredo* tratam, com detalhe, alguns pontos de importância a considerar no projecto de reactores catalíticos.

— *Clemente Nunes* e o *professor Garner* apresentam um trabalho de investigação em que estudam, no contexto da produção de polietileno hexaminas, a reacção entre 1,2-dicloroetano e N-(2-amino etil)-1,2-etanodiamina.

— Alguns dos trabalhos anteriormente referidos basearam-se em tratamentos por computador dos problemas. A possibilidade de aplicação do computador analógico na engenharia química é concretamente exemplificada por *Jorge Telhada*.

*
* *

O elevado número de participantes envolvidos no tema de implantação da indústria petroquímica em Portugal é um índice do interesse que o problema levanta e da sua importância para o país.

No seguimento desta ideia, gostaria de propôr a este Congresso as seguintes questões para discussão:

1. Perspectivas futuras da indústria petroquímica no mundo. Evolução previsível dos plásticos e das fibras sintéticas como principais produtos dela resultantes.

   Competitividade dos plásticos em relação às outras matérias-primas com a continuação da subida do preço do petróleo.

2. Perspectivas da indústria petroquímica e da indústria de transformação de plásticos em Portugal.

   Significado de uma indústria petroquímica nacional no contexto europeu.

   Importância da indústria petroquímica na balança de pagamentos portuguesa.

Referências bibliográficas

[1] **J. M. Chavarria e J. Ariandis**, «La Indústria Petroquímica de base en España en 1980-85», Economía Industrial, págs. 55-62, Julho-Agosto 1975.

[2] **B. Nathason**, Joint Meeting of the Chemical Marketing Research Association and the European Chemical Marketing Research Association, New York 1977.

[3] **G. R. Snelling**, Sixth Annual Midwest Section Conference of Society of the Plastics Industry, New York 1976.

[4] **B. F. Greek e W. F. Fallwell**, «Petrochemicals — The immediate prospects», C&EN, pág. 9, Maio 10, 1976.

[5] **F. H. Hansen**, «Trends in the cost of ethylene production», Chemistry and Industry, págs. 1005-1008, Dezembro 6, 1975.

[6] **H. G. Elias**, «Raw Materials for the polymer industry», CHEMTECH, págs. 748-751, Dezembro 1975, págs. 244-249, Abril 1976.

[7] **Predicasts** referido em «World Plastics Output to grow 9 % pa until 1990», Chemical Age, Março 4, 1977.

[8] «Oligopoly rules — The story of petrochemicals», The Economist, Novembro 1976.

[9] **G. Lauzun,** «Investissements en chaine à Fos», Le Nouvel Economiste, n.º 91, págs. 40-41, Julho 7, 1977.

[10] **P. Gay,** «Ludwigshaven cracker plan costs will total DM 500 m», Chemical Age, Janeiro 1, 1977.

[11] **C. Paya,** Madrid's Conference of the European Chemical Market Research Association, 1976.

[12] **M. Niel,** «Mono Olefins in Europe — Past, Present, Mid-Term Future», Joint Meeting and the Chemical Marketing Research Association and the European Chemical Marketing Research Association, New York, Maio 1977.

[13] **J. Dosher,** «US Chemical Demand to Exceed Economic Growth», Chemical Marketing Research Association, 1977.

[14] **K. Done,** «Interplas Conference — World plastics use should grow at annual 9 % over 10 years», The Financial Times, Setembro 14, 1977.

[15] **L. J. Ricci,** «Plastics seen as big gainer over next ten years in U.S.», Chemical Engineering, págs. 44-46, Agosto 16, 1976, referindo estudos de mercado de R. M. Kossoff & Assoc. Inc. (New York City), Du Pont Co. Plastics Products and Resins Dept. (Wilmington, Del.) and Frost & Sullivan, Inc. (New York City).

[16] **C. M. Bromley,** «Excellent prospects for UK plastics», ECN United Kingdom 75 Survey, págs. 47-50, Março 28, 1975.

NOTICIÁRIO

• Obras portuárias em Viana do Castelo

Durante uma concorrida sessão do Rotary Clube de Viana do Castelo, o eng.º Meneses Nogueira, director da Junta Autónoma dos Portos do Norte, proferiu uma palestra para abordar o momento vivido pela empreitada em curso de reconversão da zona portuária desta cidade, ilustrada com gráficos, plantas e maqueta em ordem a uma noção mais aproximada da realidade.

Precedeu a explanação com um intróito sobre alguns aspectos históricos e o que era o porto de Viana na década de 1920, apenas circunscrito a uma pequena «doca da dízima», a partir da qual se passou para a ampliação da actul doca comercial. Os trabalhos sequentes compreendendo a construção de uma doca seca, a implantação dos Estaleiros Navais e os estudos económico e técnico em ordem ao lançamento da importante empreitada, actualmente em andamento, mereceram-lhe circunstanciado descritivo.

Na sequência do progresso verificado, anunciou que já no ano findo se ultrapassou a bitola de tonelagem de mercadorias e que, num futuro próximo, o porto de Viana já poderá movimentar 300 000 toneladas/ano; porém as obras previstas dimensionam-no para um movimento da ordem do milhão de toneladas/ano.

Sobre o ritmo dos trabalhos informou que o molhe-cais exterior (que terá 2100 metros de comprimento) já tem construídos 800 metros — o prazo da empreitada conclui a 3 de Junho de 1980.

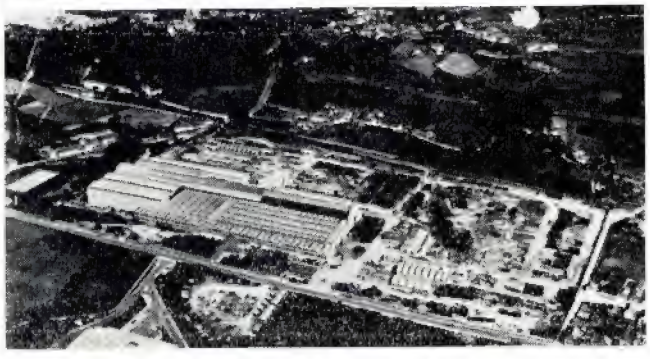
As estruturas portuárias resultantes desta reconversão, na sua primeira fase, permitem maior docagem para a frota de pesca, um cais «Roll-on/roll-off» na margem esquerda, já em fase adiantada, desvio da foz, e um molhe de retenção norte, com a criação de mais terraplenos, com posto «car-ferry».

Acentuou que ao cabo de um ano de trabalhos a fisionomia física da zona portuária vai-se modificando; o Cabedelo sofre transformações, algumas modificações morfológicas e através da maqueta foi possível observar o grau de alteração que a foz do Lima está a sofrer. A nova embocadura do rio, a sul da actual, será obtida por escavação e dragagem, constituindo um canal a — 6,5 m, dividindo as obras interiores em dois conjuntos: um formado pela retenção marginal norte, a cota — 4 m, englobando novos terraplenos e o novo cais de pesca; o outro formado pelo molhe sul, com cabeça a 8 m e o referido cais «Roll».

A dragagem a efectuar envolve o volume de cerca de 2 800 000 metros cúbicos.

Seguiu-se um período de perguntas em que o eng.º Meneses Nogueira esclareceu vários aspectos complementares.

(Informação do «Jornal de Notícias», de 22-1-78)



Sepsa

DIVISÃO METALOMECÂNICA

Equipamentos para complexos químicos e petroquímicos
Equipamentos para indústrias cimenteiras
Equipamentos para indústrias siderúrgicas
Reservatórios
Equipamentos de manutenção e transporte
Estruturas metálicas
Pontes rolantes
Guardas e separadores metálicas para estradas e auto-estradas, etc.

DIVISÃO MÁQUINAS ELÉCTRICAS

Alternadores (de potência superior a 1 000 KVA)
Motores síncronos (de potência superior a 1 000 KW)
Motores assíncronos (de potência superior a 2 000 KW)
Reparações de motores e alternadores, etc.

MONTAGENS PESADAS

Estruturas metálicas
Pontes
Reservatórios
Tubagens
Equipamentos de manutenção e transporte, etc.
Para as indústrias:
Químicas e petroquímicas
Cimenteiras
Extractivas
Siderúrgicas, etc.

Sepsa — SOCIEDADE DE CONSTRUÇÕES ELECTROMECÂNICAS, S. A. R. L.
Telefs. 95 16 16 (13 linhas) Apart. 8 — LEÇA DO BAILIO — Telex. 22616 — SEPSA-P

Já pensou...

...que o seu anúncio
é muito eficaz se for
publicado na revista que
os seus clientes lêem?
Os milhares de exemplares
de cada número da nossa revista
são lidos por engenheiros
e técnicos, por pessoas ligadas
à indústria, à investigação, ao
ensino, pelos seus clientes,
em suma. Consulte-nos

técnica REVISTA DE ENGENHARIA Avenida Rovisco Pais - Lisboa 1 - Telef. 88 93 23

C. D. U. 665.51/53

O complexo petroquímico de Sines; concepção e estado actual dos trabalhos

JOÃO PEDRO ANTUNES GOMES (1)

RESUMO

Após se dar conta dos diplomas legais que lançaram a indústria petroquímica de olefinas, apresenta-se a concepção do Complexo Petroquímico de Sines, empresas que nele participam, planeamento das instalações e investimentos previstos.

Descreve-se depois, de uma forma sumária, o estado dos trabalhos em curso, em fins de Agosto de 1977.

SUMMARY

After mentioning the legal documents that created the olefins petrochemical industry, we describe the conception of the Sines Petrochemical Complex, participating companies, installations planning and foreseen investments.

Afterwards, we summarise the actual development of the works, in the end of August 1977.

1 — INTRODUÇÃO

O desenvolvimento do País, imprescindível para a elevação do nível de vida do povo português, passa inevitavelmente pela instalação de certas indústrias fundamentais. Entre estas, destaca-se a indústria petroquímica, factor produtivo e multiplicativo de riqueza nacional e veículo de desenvolvimento tecnológico e social. A sua implantação virá contribuir para a correcção do desequilíbrio existente no sector industrial, revitalizando várias outras actividades.

Além disso, em países de nível industrial não muito superior ao português e que levaram a efeito programas petroquímicos, verificou-se que o aparecimento do primeiro polo petroquímico dinamizou toda a actividade industrial, principalmente o sector que vai desde a refinação de petróleos até à transformação das matérias plásticas e das fibras sintéticas nos inúmeros produtos e tecidos de uso quotidiano.

A inexistência de uma indústria petroquímica portuguesa tem vindo a afectar o desenvolvimento de um sector importante da nossa economia com os consequentes efeitos prejudiciais de ordem social e económica.

A conjuntura económica actual de Portugal carece de iniciativas conducentes à obtenção de maior utilização da força de trabalho e ao equilíbrio da balança de pagamentos.

Decidiu o Governo dar prioridade à instalação da indústria petroquímica, pois, durante a fase de construção, irá assegurar um considerável volume de emprego de especialidades muito diversificadas e terá um forte efeito dinamizador nos sectores da metalo-mecânica, material eléctrico, construção civil e gabinetes de engenharia e, na fase de exploração, irá dinamizar os sectores de mão-de-obra intensiva a jusante, isto é, a indústria transformadora de plásticos, a indústria transformadora de borracha e a indústria têxtil.

Outro aspecto importante é a projecção que a indústria petroquímica vai ter na refinaçãço de petróleos, pois vai escoar e valorizar alguns refinados correspondentes a capacidades excedentárias das refinarias portuguesas.

2 — LANÇAMENTO DA INDÚSTRIA PETROQUÍMICA DE OLEFINAS

Quando, por despacho ministerial de 16 de Outubro de 1970, foi estabelecido o plano geral de desenvolvimento das actividades refinadora de petróleos e petroquímica, foi definido que a refinaria existente no Porto se orientaria para a obtenção de produtos aromáticos e foi prevista a instalação, no sul do país, de uma nova refinaria, terminal marítimo adequado e um complexo petroquímico de olefinas.

(1) — Engenheiro Químico-Industrial.
Administrador da CNP — Companhia Nacional de Petroquímica, E. P.

Comunicação apresentada ao Congresso da Ordem dos Engenheiros, Lisboa, Novembro 1977.

Estudos posteriores levaram à decisão da instalação destas últimas unidades em Sines (Decreto-Lei n.º 270/71, de 19 de Junho).

O Decreto-Lei n.º 497/71, de 12 de Novembro, autorizou o exercício da indústria de refinação de petróleos a uma sociedade a ser constituída pela SONAP — Sociedade Nacional de Petróleos, S.A.R.L., e CUF — Companhia União Fabril, S.A.R.L., devendo aquela nova sociedade promover a constituição de uma outra sociedade com o objecto de instalar e explorar uma unidade petroquímica de olefinas.

A sociedade refinadora PETROSUL — Sociedade Portuguesa de Refinação de Petróleos, S.A.R.L. foi constituída em 3 de Março de 1972 e a sociedade petroquímica CNP — Companhia Nacional de Petroquímica, S. A. R. L., em 7 de Julho de 1972, com um capital social de 500 000 contos.

Após um longo período de estudos e negociações, foi finalmente publicado o Decreto-Lei n.º 108/75, de 6 de Março, regulamentando a actividade da CNP, definindo as capacidades anuais mínimas a respeitar na realização dos projectos relativos a cada um dos diversos produtos petroquímicos e determinando ao mesmo tempo, a separação das indústrias petroquímica e de refinação de petróleos.

Dada a importância vital da indústria petroquímica de olefinas numa estratégia de desenvolvimento integrado, o Governo decidiu, pelo Decreto-Lei n.º 453/75, de 21 de Agosto, a nacionalização da Companhia Nacional de Petroquímica, transformada em empresa pública pelo Decreto-Lei n.º 848/76, de 16 de Dezembro, ficando o seu capital estatutário fixado em 4 milhões de contos.

3 — O COMPLEXO PETROQUÍMICO DE SINES

3.1 — Concepção

O Complexo Petroquímico de Olefinas, dada a sua localização estratégica junto a um moderno porto atlântico de águas profundas, abrirá promissoras perspectivas de comércio internacional de produtos petroquímicos.

Numerosos e aprofundados estudos que têm sido efectuados com base na evolução do mercado português, na possibilidade de colocar no estrangeiro parte da produção, na vantagem económica de exportar produtos mais elaborados que os excedentes da refinação e considerações de economia de escala, levaram a concluir que a capacidade mais aconselhável para a fábrica de etileno seria de 300 000 toneladas/ano.

É evidente que a construção da fábrica de etileno isolada, sem se poder apoiar em unidades consumidores dos seus produtos, não seria viável. Daí que, simultaneamente com a fábrica de etileno, tivesse sido estudado um conjunto de unidades a jusante equilibrado e economicamente justificado. Esses estudos consideraram aspectos de dimensão do mercado interno, de possibilidade de exportação, de facilidade de acesso a tecnologia e de apoio possível no campo da técnica e da comercialização.

Chegou-se então ao esquema conceptual do Complexo Petroquímico formado pelas seguintes unidades produtoras e que se apresenta no Anexo I:

Etileno (steam-cracker)	300 000 t/ano
Benzeno	130 000 t/ano
Butadieno	44 000 t/ano
Polietileno de baixa densidade (PEBD)	120 000 t/ano
Polietileno de alta densidade (PEAD)	60 000 t/ano
Polipropileno (PP)	50 000 t/ano
Cloreto de vinilo monómero (VCM)	150 000 t/ano
Policloreto de vinilo (PVC)	55 000 t/ano
Acrilonitrilo (ACN)	50 a 70 000 t/ano
Estireno (S)	150 000 t/ano
Poliestireno (PS)	35 000 t/ano
Borracha de estireno-butadieno (SBR)	50 000 t/ano

Fazendo ainda parte do Complexo, existirão unidades cuja função será o fornecimento de meios auxiliares de produção às diversas fábricas. Estão neste caso a produção de vapor, energia eléctrica, água de arrefecimento, ar comprimido e azoto, bem como serviços de segurança, sociais, administrativos, oficinas e laboratórios.

Desde o início tem sido dedicado especial cuidado à preservação ecológica, estando previstos vários níveis sucessivos de tratamento de efluentes líquidos e gasosos, bem como medidas eficientes de luta contra o ruído. O trabalho realizado tem tido em atenção as normas dimanadas pelo Gabinete da Área de Sines, bem como as recomendações da prática internacional.

Como o Complexo Petroquímico virá a constituir uma base de exportações e trocas de produtos que se efectuarão a partir do porto de Sines, ficará ligado a este por pipe-lines com cerca de 7 km de extensão e possuirá, na zona portuária, instalações de armazenagem e trasfega de produtos que se processarão num terminal especializado.

3.2 — A CNP — Companhia Nacional de Petroquímica, E.P.

«A CNP tem como objecto principal a produção e a comercialização de:

a) Compostos olefínicos monoméricos (hidrocarbonetos ou não) e poliméricos obtidos a partir de hidrocarbonetos provenientes da refinação de petróleos, condensados de gás natural ou outros;

b) Outros compostos cuja produção esteja ligada à dos indicados em *a*) ou sejam necessários para a sua produção.

A CNP tem ainda como objecto o exercício de direitos de participação social em empresas que se dediquem à produção e à comercialização dos produtos indicados anteriormente e, acessoriamente, a venda de serviços e o exercício de outras actividades relacionadas com o objecto principal.» (*)

Dispõe a CNP de um quadro de 178 colaboradores (em 31/7/77), dos quais 78 técnicos de formação universitária, todos portugueses, aos quais tem sido imposto um programa de aperfeiçoamento e de adaptação dos seus conhecimentos à nova indústria que vão construir.

Com a entrada em funcionamento de todas as instalações do Complexo Petroquímico, o número de postos de trabalho permanentes criados atingirá um valor da ordem dos 2200.

A CNP tem vindo a desenvolver a sua organização com a flexibilidade suficiente, tendo em consideração a estruturação de uma orgânica, quer fabril, quer comercial, sem esquecer o apoio do planeamento das diferentes acções a desencadear e a executar, bem como o respectivo controle por via informática.

Das unidades a seu cargo, adjudicou a CNP, em Junho de 1976, o projecto e construção da fábrica de etileno à empresa alemã LINDE AG, em Julho de 1976, o projecto e supervisão da construção da central termoeléctrica à empresa belga Electrobel Engineering International S. A. e, em Julho de 1977, o projecto e construção do terminal portuário para etileno e propileno ao consórcio franco-português formado pelas firmas CMP — Constructions Métalliques de Provence, EQUIMETAL — Empresa Fabril de Equipamentos Metálicos S. A. R. L., MOMPOR — Companhia Portuguesa de Montagens Industriais, S. A. R. L. e SOREFAME — Sociedades Reunidas de Fabricações Metálicas, S. A. R. L.

Também em Maio de 1977, após selecção do processo de extracção de butadieno, foi assinado o respectivo contrato de licença com a empresa japonesa Nippon Zeon Co. Ltd.

3.3 — Empresas afiliadas da CNP

Tal como o seu estatuto prevê, pode a CNP vir a executar uma parte do Complexo Petroquímico a seu cargo, através de «joint-ventures» com empresas estrangeiras, sempre que a garantia de colocação de produtos no mercado internacional ou a necessidade de apoio tecnológico o aconselhe e justifique.

Assim, foi criada a EPSI — Empresa de Polímeros de Sines, S. A. R. L., em associação com a empresa pública francesa CdF Chimie, que se irá ocupar da produção de poliolefinas, e encontra-se em negociação outra «joint-venture» com uma empresa inglesa, para a produção de butadieno e estireno e, eventualmente, borracha sintética.

Estas afiliadas, onde a CNP é maioritária, revelam, quer a confiança nos planos da Empresa, quer o seu dimensionamento correcto à escala internacional.

A EPSI — Empresa de Polímeros de Sines, S. A. R. L.

Os contactos que, já de longa data, vinham sendo efectuados entre a CNP e a empresa pública francesa Société Chimique des Charbonnages — CdF Chimie, conduziram à constituição, em 26 de Junho de 1976, da EPSI, com um capital social de 10 000 contos, posteriormente aumentado para 1 500 000 contos, sendo a participação da CNP de 72 %.

Esta empresa tem a seu cargo a construção das fábricas de polietileno de baixa densidade, polietileno de alta densidade e polipropileno. A constituição desta «joint-venture» vem atestar, de forma evidente, a confiança que uma entidade estrangeira depositou na capacidade realizadora dos técnicos e das empresas portuguesas, bem como a importância e actualidade da indústria petroquímica.

A realização das 3 fábricas citadas permite, não só assegurar, através da fixação das suas capacidades de produção, o núcleo base indispensável para o

(*) — Estatuto da CNP, artigo 3.º (anexo ao Decreto-Lei n.º 848/76, de 16 de Dezembro).

arranque do Complexo Petroquímico, como também pôr à disposição da indústria portuguesa transformadora de matérias plásticas a matéria-prima que necessite, em quantidade e qualidade, sem necessidade de recurso à importação. Para isso, a EPSI teve o cuidado de seleccionar tecnologias que, pelos seus tipos de produtos, melhor se adaptassem aos hábitos e necessidades da indústria transformadora de matérias plásticas.

Assim, a EPSI firmou já os seguintes contratos de licença:

— polietileno de baixa densidade, com a empresa francesa CdF Chimie, em Agosto de 1976;
— polietileno de alta densidade, com a empresa japonesa Mitsui Petrochemical Industries Ltd., em Janeiro de 1977;
— polipropileno, com a empresa japonesa Mitsui Toatsu Chemicals Inc., em Março de 1977.

Também foi já possível adjudicar o projecto e construção da fábrica de polietileno de baixa densidade à firma belga S. A. Coppée-Rust N. V., em Junho de 1977.

3.4 — Planeamento das instalações

No anexo II apresenta-se o planeamento de arranques das diferentes unidades.

Assim, prevê-se o arranque da 1.ª unidade — o «steam-cracker» — em Março de 1979 e o da última (na actual concepção do complexo) no início de 1983.

3.5 — Investimentos

Para a realização destes projectos prevê-se, tal como se indica no Anexo III, um dispêndio da ordem de 29 milhões de contos.

A participação da indústria e serviços nacionais para a realização global dos investimentos deverá ser da ordem de 65 %, tendo-se adoptado critérios de intervenção directa nos contratos de fornecimento das fábricas, no sentido de defender ao máximo a participação das empresas portuguesas. Deste modo, a participação nacional assim prevista irá contribuir positivamente para a dinamização de uma grande parte dos sectores industriais em crise.

Não obstante as dificuldades presentes da escassez de crédito internacional, foi possível, através de estudos tecno-económicos, suscitar um franco interesse da banca internacional nos projectos referentes ao Complexo Petroquímico de Sines, o que atesta a confiança depositada nos técnicos portugueses e constitui resultado francamente animador para o esforço desenvolvido.

Como cobertura dos fornecimentos estrangeiros nos primeiros projectos em execução do Complexo Petroquímico, foi possível à CNP contratar já os seguintes financiamentos:

— para o «steam-cracker» — créditos no valor de 170 milhões de francos franceses, 135 milhões de marcos e 12 milhões de dólares que, aos câmbios actuais (*), correspondem a cerca de 4,1 milhões de contos;
— para a central termoeléctrica e outras unidades dos serviços auxiliares — 1200 milhões de francos belgas e 9 milhões de dólares que, aos câmbios actuais (*), correspondem a cerca de 1,7 milhões de contos.

Para o mesmo fim, contratou já a EPSI um financiamento de 200 milhões de francos franceses e 15 milhões de dólares que, aos câmbios actuais (*), correspondem a cerca de 2,2 milhões de contos.

Continuam a CNP e a EPSI em negociações com a banca estrangeira no sentido de concretizarem os financiamentos necessários à cobertura dos fornecimentos estrangeiros para as restantes unidades.

É política da CNP, extensível às suas afiliadas, e para o que tem recebido apoio governamental, manter sempre um saldo positivo de divisas, quer durante a construção, financiando as importações com créditos estrangeiros, quer durante a exploração das fábricas, apoiada na política comercial de exportar boa parte da produção.

Como cobertura dos fornecimentos nacionais para o Complexo Petroquímico, contam as empresas com os seus capitais próprios e créditos concedidos pela banca portuguesa, a qual tem prestado, sempre que necessário, todo o seu apoio.

3.6 — Estado actual dos trabalhos (fim de Agosto de 1977)

Neste ponto, pretende apresentar-se uma descrição resumida do estado de adiantamento das principais obras já efectuadas, ou em curso, e referentes, quer aos trabalhos preliminares realizados em Sines, quer às fábricas cujas execuções já foram adjudicadas.

De notar que os trabalhos preliminares foram totalmente executados por firmas portuguesas.

3.6.1 — Trabalhos preliminares em Sines

O terreno atribuído ao Complexo Petroquímico tem 254 ha de área, na sua maior parte densamente arborizado com pinheiros e eucaliptos.

Decidido que, numa 1.ª fase se terraplanariam cerca de 115 ha, encarregou-se o Gabinete da Área de Sines do corte e remoção das árvores.

Em Junho de 1976, iniciou-se a empreitada de terraplanagens, adjudicada pela CNP ao consórcio

(*) — Fim de Agosto de 1977.

formado pelas firmas Construtora do Tâmega, Ld.ª, Construções A. Supico, S. A. R. L. e A. A. Bastos Jr., Ld.ª. Constou esta empreitada da execução dos trabalhos de implantação, desmatação e destronca, demolições, limpeza e remoção de detritos, decapagem e terraplanagem. A empreitada está perto da conclusão, tendo sido movimentado, aproximadamente, 1 milhão de m3 de terra e gastos, até agora, cerca de 174 000 contos.

Está também em fase de conclusão a empreitada de instalação das tubagens para abastecimento de água aos estaleiros, adjudicada à Sociedade Comercial Luso-Italiana, Ld.ª, por cerca de 4500 contos.

Também está já parcialmente concluída a empreitada de electrificação dos estaleiros de construção, adjudicada à ASEA Eléctrica, Ld.ª por cerca de 32 000 contos. A instalação é essencialmente constituída por um posto de seccionamento a 30 kv e diversos postos de transformação 30 000/380 v.

Está ainda em execução a empreitada de construção dos escritórios, armazéns e sanitários pré-fabricados destinados à CNP, Linde e Electrobel, e adjudicada à CASVEL — Casas Desmontáveis, Ld.ª, por cerca de 32 000 contos.

Foi adjudicada, em Agosto de 1977, a empreitada de construção dos arruamentos internos do Complexo e rede de esgotos, ao mesmo consórcio adjudicatário das terraplanagens, sendo o custo estimado da ordem de 70 000 contos.

Em outros trabalhos de menores custos, utilizou a CNP ainda os serviços das seguintes empresas: GEOCONTROLE — Gabinete de Geotecnia e Topografia, Ld.ª, GEOPLANO — Consultores Geotécnicos, Ld.ª, HENPAR — Henriques & Pardal, Ld.ª, ILÍDIO MONTEIRO CONSTRUÇÕES, S. A. R. L., PROFABRIL — Centro de Projectos, S. A. R. L., PROPLANO — Gabinete de Estudos e Projectos, Ld.ª.

3.6.2 — Unidades industriais já adjudicadas

Fábrica de Etileno

Está praticamente concluída a engenharia.

Em meados de Agosto de 1977, estavam passadas encomendas no valor de 2932 milhares de contos, sendo a participação da indústria portuguesa de 745 mil contos (25,5 %). Espera-se que a participação final da indústria nacional chegue a 52 %.

A LINDE abriu o seu estaleiro em Portugal, em Julho de 1977.

Na altura em que se redige esta comunicação, está a montar-se a tubagem subterrânea e começam a executar-se os primeiros trabalhos de construção civil, a cargo dos sub-empreiteiros portugueses da LINDE.

Central Termoeléctrica

Está em curso a engenharia, estando realizado cerca de 60 % do trabalho.

No fim de Julho de 1977, estavam passadas encomendas no valor de 1397 milhares de contos, sendo a participação da indústria portuguesa de 584 mil contos (41,8 %). Espera-se que a participação final da indústria nacional chegue a 65 %.

Terminal portuário de etileno e propileno

Estão no início os trabalhos de engenharia.

Fábrica de polietileno de baixa densidade

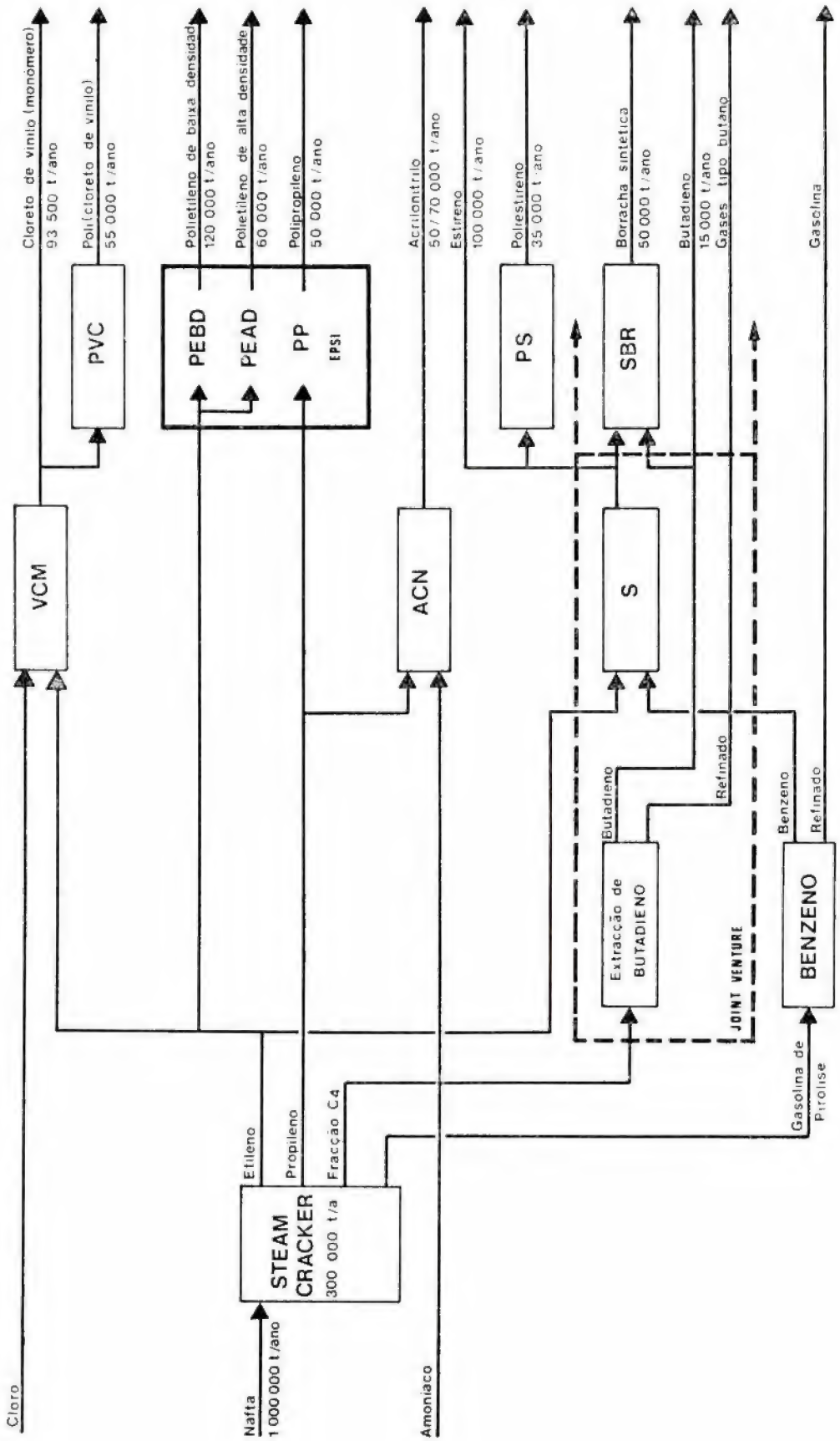
Estão em curso os trabalhos de engenharia, tendo sido passadas algumas encomendas de equipamento que se encontravam no caminho crítico.

anexo I

sines

complexo petroquímico

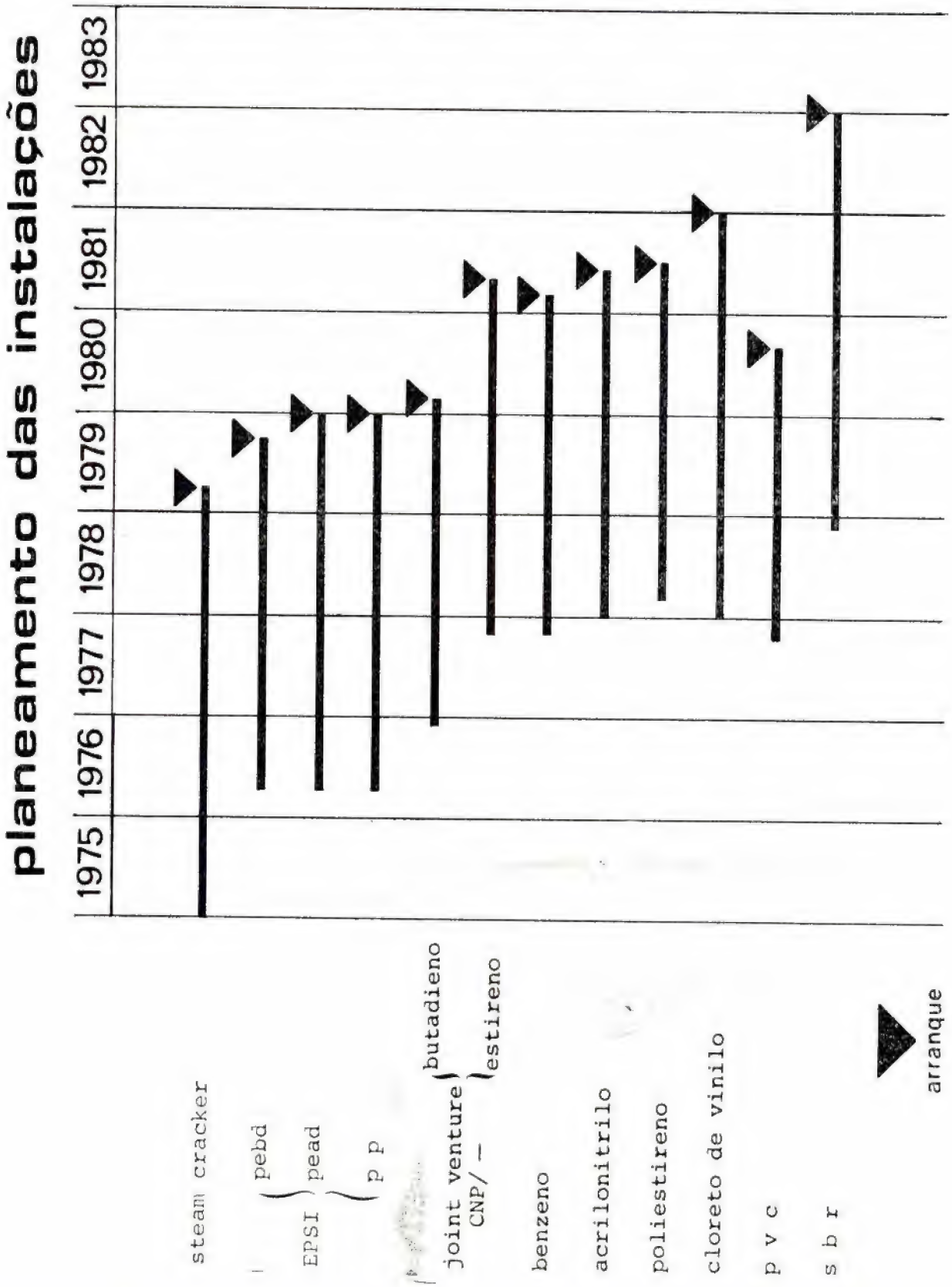
esquema básico



anexo II

sines

complexo petroquímico



anexo III

sines

complexo petroquímico

investimentos em milhares de contos

projectos	valor do investimento
cnp	
PROJECTOS PRINCIPAIS	
steam-cracker	6 900
produção de benzeno	900
extracção de butadieno	875
acrilonitrilo	1 900
v c m	1 430
estireno	2 200
p v c	1 500
p s	850
s b r	1 400
INFRA-ESTRUTURAS E SERVIÇOS DE APOIO	
central termoeléctrica	2 335
terminal portuário	1 090
outros	2 075
totais	23 455
epsi	
polietileno baixa densidade	2 900
polietileno alta densidade	1 300
polipropileno	1 600
totais	5 800

C. D. U. 669.14:621.785:620.163

O controle de qualidade nos tratamentos térmicos

ANTERA VALERIANA DE SEABRA (1)

RESUMO

Em face da importância cada vez maior do «Controle de Qualidade» para gaarntia do nível de qualidade das peças obtidas segundo dado processo de fabricação referem-se no II Capítulo algumas considerações fundamentais, relativamente a peças sujeitas a tratamento térmico desde a selecção da matéria-prima até ao controle do produto final.

Para um melhor enquadramento do assunto recordam-se num primeiro capítulo as noções gerais relativas aos conceitos de Qualidade, Controle e Controle de Qualidade.

SUMMARY

Taking into account the increasing importance of Quality Control to guarantee the level of quality of parts obtained by any manufacturing process, in Chapter II some basic considerations are made as regards heat-treated parts, starting from the selection of raw-materials up to the control of the final product.

To put the matter inte its right perspective, Chapter I recalle some general notiens on the concepts of Quality Control and Control of Quality.

CAPÍTULO I

CONCEITOS GERAIS

A grande diversidade de produtos fabricados, os inúmeros fabricantes dum dado produto, a exigência do consumidor e a própria inflação motivam um interesse cada vez maior pela *Qualidade*, pelo *Controle* e pelo *Controle de Qualidade* desses mesmos produtos.

Assim, antes de entrarmos propriamente no assunto do «Controle de Qualidade nos Tratamentos Térmicos» vamos referir alguns conceitos que são essenciais para o enquadramento do mesmo.

1 — QUALIDADE

1.1 — Definição

O conceito de *Qualidade* é certamente dos mais antigos da humanidade pois o Homem sempre deve ter procurado, ao pretender utilizar determinado objecto, seleccionar o bom do mau ou o que lhe dava melhor satisfação. Esta noção primitiva, embora ainda corrente entre nós, tem no entanto tido certa evolução no Séc. XX e hoje acaba por ter um duplo sentido que a torna naturalmente equívoca. Designa-se correntemente por *produto de qualidade* aquele que apresenta excelentes características enquanto que, dum ponto de vista mais normativo (espírito anglo-saxónico), basta que esse produto obedeça às características especificadas *para determinado fim* e a sua fabricação se faça em condições económicas satisfatórias.

A expressão *para determinado fim* mostra como o conceito de *Qualidade* está intimamente ligado com a *aptidão ao uso* a que o produto se destina. É evidente que esta aptidão variará de produto para produto e até de serviço para serviço e é, essencialmente, avaliada pelo utente, por exemplo: horário dos autocarros, duração dos sapatos, duma mola, dum carro, etc.

Segundo a última definição basta que a *Qualidade* seja suficiente. Assim, uma fabricação pode considerar-se de boa qualidade mesmo que o objecto seja medíocre mas *suficiente* para a *utilização* a que é destinado desde que esteja conforme com as normas.

(1) Principal research officer, Head of Division, «Laboratório Nacional de Engenharia Civil», Lisboa.
(1) Investigadora e Chefe de Divisão do Laboratório Nacional de Engenharia Civil — Lisboa.
Comunicação apresentada ao Congresso da Ordem dos Engenheiros, Lisboa, Novembro 1977.

Como se vê este conceito acaba por ser confuso e difícil de apreciar. Este facto levou a AFNOR através da norma NF X-06-011 [1] a tentar objectiva-lo, procurando definir para cada fornecimento de dado produto a *Qualidade global* resultante da apreciação da *Qualidade técnica* e da *Qualidade comercial* desse produto.

A *Qualidade técnica* corresponde ao conjunto das características especificadas e que podem ser determinadas por meio de exames ou ensaios mais ou menos complexos, isto é, o conjunto de certo número de dados oferecidos pelos objectos desse fornecimento no momento da entrega e susceptíveis de serem apreciados directa ou indirectamente. Estes exames consoante a sua natureza e o tipo de produto podem ser realizados sobre a totalidade do fornecimento ou apenas sobre uma amostra, sendo então os resultados generalizáveis ao todo, com maior ou menor incerteza.

Na *Qualidade comercial* intervêm diversos factores como:

— Preço a pagar ao vendedor
— Condições de entrega (especialmente atrasos)
— Condições de pagamento (especialmente prazos)
— Reputação do vendedor e do fabricante
— Garantias especificadas pelo vendedor

É evidente que, actualmente, o preço, a rapidez de entrega ou as facilidades de pagamento têm tanto interesse na aquisição dum produto como as suas características intrínsecas para determinado uso.

1.2 — Factores de Qualidade

São muito diversos os factores que influenciam na *Qualidade* dum produto pois, como vimos, este está condicionado, por um lado, pelo uso a que o utente os destina e, por outro, pelo fabricante. Como consequência são igualmente envolvidos factores tecnológicos (características e condições de fabricação), económicos (preços de custo, de revenda, etc.), contratuais (garantias de fornecimento, etc.), psicológicos (gosto, beleza, etc.), éticos (cortesia nas relações, honestidade, etc.).

Na publicação «Quality Control Handbook» [2] J. M. Juran procurou sistematizar estes factores correlacionando-os através dos seguintes parametros:

— Qualidade do projecto
— Qualidade de conformidade
— Operacionalidade
— Assistência

Segue-se uma referência a cada um destes parametros e aos seus principais factores cuja inter-relação se apresenta no seguinte esquema:

Qualidade do projecto	Qualidade da pesquisa de mercado Qualidade da concepção Qualidade da especificação
Qualidade de conformidade	Tecnologia Meios humanos Direcção
Operacionalidade (continuidade em serviço)	Confiança Conservação Apoio logístico
Assistência	Prontidão Competência Integridade

1.2.1 — Qualidade do projecto

A qualidade do projecto dependerá essencialmente da qualidade da *pesquisa de mercados*, ou seja, da identificação do que tem interesse produzir para o utente; da *qualidade da concepção* desse produto ou desse serviço e da *qualidade das especificações* elaboradas. Estas se forem inteiramente executadas garantem e satisfazem as necessidades do utente.

1.2.2 — Qualidade de conformidade

O projecto deve reflectir as exigências de aptidão ao uso e o produto, por sua vez, deve estar conforme com o projecto, isto é, ter a «qualidade de satisfazer inteiramente ao projecto». Este termo é muitas vezes equivalente a *«qualidade de fabrico»*, *«qualidade de produção»* ou *«qualidade do produto»*. Esta qualidade resulta de numerosas variáveis: máquinas, ferramentas, trabalho dos operários, supervisão, etc.

1.2.3 — Operacionalidade

Para produtos que são imediatamente consumidos (alimentos, óleos, etc.) as duas qualidades anteriores são suficientes para apreciar o produto mas quando este deve ter uma vida mais ou menos longa têm de ser considerados alguns factores dependentes do tempo como *confiança, conservação* e apoio *logístico* que estão inter-relacionados e são vitais para o utente.

A *operacionalidade* ou *continuidade em serviço* é muito importante e é medida pelo tempo durante o qual o utente tem determinado serviço assegurado (transportes, água, energia, etc.) ou pode utilizar certo produto (ferramenta, automóvel, etc.). Este estado operacional depende, em grande parte, de não haver falhas ou deficiências. Se estas não existissem dir-se-ia que a *confiança* no produto seria de 100 %. Na realidade isto é apenas ideal e este factor é defi-

nido na prática como *«a probabilidade dum produto satisfazer sem falhas uma função especificada sob dadas condições e durante certo tempo»*. A quantificação deste factor permitirá cientificamente uma melhoria do produto. A *confiança* não deve confundir-se com a obediência à especificação relativa ao produto nem com estimativas baseadas em ensaios de longa duração em laboratório. A sua avaliação requere o uso real do produto durante um período de tempo suficientemente longo e a recolha e interpretação de dados sobre o bom comportamento e acidentes durante esse tempo.

Quanto à *conservação*, que em muito contribui para a duração do produto, ela tem dois aspectos fundamentais: *um preventivo* e *outro acidental*. Ao primeiro cabe examinar o produto regularmente de modo a detectar falhas potenciais, lubrificar e substituir peças de acordo com um programa, etc. O segundo aspecto inclui as falhas que obrigam a reparações e substituições não previstas. A *conservação* requere não só tempo mas também meios humanos, material, acessórios ou peças em reserva, verbas suplementares e outros custos. A avaliação da conservação inclui ainda o tempo médio de reparação e a probabilidade de reparação num dado intervalo de tempo.

A eficiência da conservação é também grandemente influenciada pela existência e confiança das peças de reserva algumas vezes designadas por apoio logístico.

1.2.4 — Assistência

Este é o último parâmetro considerado mas não o de menor importância para o utente e está dependente de diversos condicionamentos como:

— Contactos de serviço inequívocos e claros
— Adequado equipamento e sobresselentes
— Recrutamento e treino do pessoal do serviço competente para diagnose das falhas e sua reparação
— Resposta pronta
— Cortesia e integridade

1.3 — Função de Qualidade

Embora o conceito de *Qualidade* seja bastante antigo a sua quantificação só actualmente tenta conseguir tornar-se realidade. Todavia, as características tecnológicas em particular as propriedades dos materiais foram sendo quantificadas à medida que a ciência e a técnica instrumental evoluia.

Para fixar um dado *nível de qualidade* é desejável, mesmo indispensável, que se possam atribuir números aos diversos aspectos, recorrendo-se a grandezas mensuráveis de que se possa conhecer as relações com a qualidade. Isto é fácil com as grandezas químicas ou físicas mas nem sempre é possível com outras características e então deve recorrer-se a índices obtidos por referência com colecções-tipo normalizadas. Assim, a qualidade do produto será, tanto quanto possível, representada por um ou vários números caracterizando cada um deles um dos seus aspectos particulares.

O *nível de qualidade* será então fixado pelos limites para cada um destes números.

Se, por exemplo, se fixar para certa propriedade, os limites $\underline{M}$ e $\underline{m}$ e se, para o produto estudado, esta propriedade for representada por um número $\underline{N}$ poder-se-á caracterizar a fracção da Qualidade ou a Qualidade se essa propriedade for a única a avaliar, por uma expressão como a exemplificada por

$$Q = \frac{N-m}{M-m}$$

Embora demasiado esquematizada, esta representação quantitativa da Qualidade pode ser generalizada. A *Qualidade Global* do produto é cumulativa e resultante da sobreposição de qualidades elementares. Se, por exemplo, falarmos da qualidade duma peça metálica poderemos decompor a Qualidade Global em várias qualidades técnicas e comerciais como:

— Qualidade do metal
— Tolerância de dimensões
— Estado de superfície
— Regularidade de fabricação
— Preço de revenda, etc.

Estas qualidades elementares podem não ter todas a mesma importância do ponto de vista da utilização, pois, poder-se-á ser mais exigente para as tolerâncias que para o estado de superfície ou, pelo contrário, para a qualidade do metal. Cada um dos *índices de qualidade* será então afectado dum coeficiente subjectivo e a qualidade global será expressa como uma função das qualidades elementares assim ponderadas:

$$Q = f\ (a\ Q_1 \times b\ Q_2 \times cQ_3\ \times \ldots)$$

Esta função será nula se um dos índices elementares for nulo.

É evidente que a escolha dos coeficientes e as regras de combinação deverão ser feitas com muito discernimento, tendo em conta a utilização do produto e condições da sua fabricação.

Consegue-se assim atribuir ao artigo ou ao produto um *Índice de Qualidade*.

O que se aplica ao artigo ou produto acabado é igualmente válido para esses artigos ou produtos durante o ciclo de fabricação. Se quisermos analisar uma fabricação há que dividi-la em várias etapas em que se pode considerar que cada uma produz um objecto intermediário: tratar-se-á a qualidade deste objecto como se ele fosse um produto final. A necessária apreciação será feita de acordo com o seu destino que é a etapa seguinte da fabricação. Assim, a qualidade do produto acabado será uma função mais ou menos complexa dos índices de qualidade de cada um dos estados intermediários.

Embora haja um aspecto esquemático e teórico neste tratamento ele não deixa de ter interesse prático visto que estas considerações bem compreendidas permitem actuar para obter melhoria da fabricação.

Suponhamos, com efeito, que uma fabricação tem n etapas A, B, C, D, E e chamemos Q_A, Q_B, $Q_C \cdots$, os índices de qualidade de cada etapa. A qualidade da fabricação poderá ser definida por

$$Q = \sqrt[n]{Q_A \times Q_B \times Q_C \times Q_D \times \ldots}$$

Se num caso concreto as qualidades, elementares forem 4 e tiverem os valores 0,70, 0,45, 0,80 e 0,75 a qualidade global será

$$Q = \sqrt[4]{0{,}70 \times 0{,}45 \times 0{,}80 \times 0{,}75} = \sqrt[4]{0{,}198} = 0{,}667$$

Vemos facilmente que é sobre a segunda etapa, cujo índice é muito inferior ao índice médio que deverão incidir os esforços para melhoria do produto. Deste modo, a análise duma fabricação seguindo estes métodos permite pôr problemas precisos aos encarregados da fabricação.

Como consequência, a *Função de qualidade é o conjunto complexo das actividades através das quais se consegue a melhor aptidão ao uso, sem interessar onde elas são obtidas nas melhores condições.*

Como vimos o êxito da aptidão ao uso de dado produto envolve a boa execução dum certo número de actividades que se desenvolvem em progressão lógica. A Fig. 1 conhecida como *Espiral de Progresso da Qualidade* apresenta a evolução das actividades consideradas principais. Cada volta da espiral principia com a pesquisa e desenvolvimento do produto a criar ou a melhorar a sua aptidão ao uso. A melhoria proposta é fruto da experiência em serviço real que cria novas ideias, dando lugar a nova volta da espiral. Este esquema evidencia ainda que o êxito do produto ou dos serviços depende da colaboração de muitas pessoas espalhadas por departamentos muito especializados. Relativamente à fabricação, umas estão directamente ligadas à fábrica mas outras são exteriores a esta como os vendedores, consumidores, utentes, etc. Exactamente o maior problema da indústria moderna consiste em orquestrar com êxito todo esse conjunto de actividades.

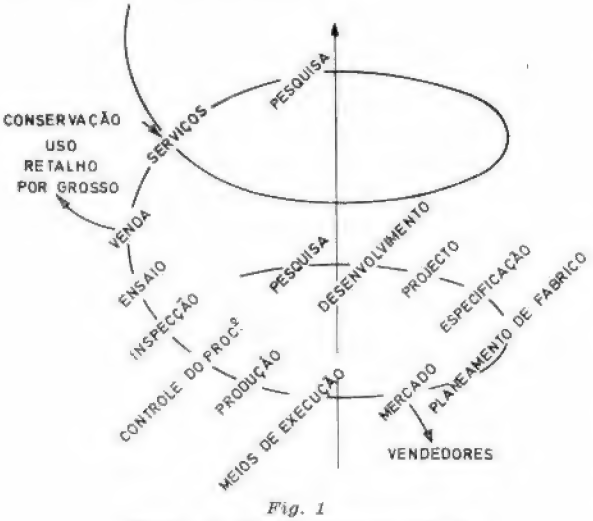


Fig. 1
Espiral do Progresso em Qualidade

2 — CONTROLE

Depois da noção de *Qualidade* o conceito mais importante é o de *Controle* e em seguida, de *Controle de Qualidade.*

Tal como para a *Qualidade* também a palavra *Controle* pode ter um significado mais ou menos complexo. Na acepção francesa é equivalente a *inspecção* e engloba todos os método utilizados para verificar a conformidade das propriedades do produto com as prescritas quer por normas, por especificações oficiais ou particulares quer por regras fixadas pelo próprio fabricante. Limita-se, portanto, a constatar o estado duma fabricação e a classificar os produtos em bons ou maus. É um papel passivo.

Pelo contrário, no espírito inglês, além da «inspecção» o *Controle* inclui ainda o de guia da fabricação para um determinado fim. É por consequência, mais lato e activo: localiza ou procura localizar o que numa fabricação condiciona produtos bons e produtos maus e tende a actuar no sentido favorável.

Entre nós *Controle* é sinónimo de verificação e fiscalização aproximando-se mais da noção francesa.

Consideramos, todavia, preferível e mais construtiva a interpretação inglesa cujo *Controle* consiste num processo de apreciação e melhoramento que se pode dividir nas seguintes etapas:

— Escolha do objecto de controle, isto é, selecção do que vai ser regulamentado
— Selecção da unidade de medida
— Estabelecimento da especificação da característica de qualidade
— Criação, se necessário, dum aparelho sensível para avaliação dessa característica
— Execução da medida
— Interpretação da diferença entre o real e o especificado
— Actuação sobre essa diferença.

Poder-se-á assim controlar qualquer produto, serviço ou etapa desde que se saiba o quê, como e para quê.

Cabe ainda aqui recordar os vários tipos de Controle que se podem efectuar:

— *Controle a 100 %*
— *Controle Unitário*
— *Controle Estatístico*

A escolha de um ou de outro depende do tipo das peças, do preço de custo e dos riscos aceites.

O *Controle a 100 %* corresponde a ensaiar todas as peças directa ou indirectamente, sendo portanto, uma solução ideal. Todavia o facto dos ensaios serem morosos e caros e, em geral, destrutivos leva a limitar este tipo de controle apenas aos artigos cuja utilização pode pôr em risco vidas humanas, investimentos vultosos ou num fabrico difícil susceptível, portanto, de dar uma percentagem elevada de peças más. O preço de custo pode ser reduzido se se efec-

tuar o Controle a 100 % apenas no produto acabado e se fizer o controle por amostragem durante a fabricação.

Por exemplo, em siderurgia faz-se o Controle a 100 % de cada vazamento do aço determinando a sua composição química e registando as condições de vazamento, resultados que acompanharão o fornecimento dos produtos provenientes deste vazamento.

No *Controle Unitário* retira-se uma peça de vez em quando no decurso da fabricação. Neste caso a apreciação dos resultados deve ter em conta a variabilidade de peça na série de fabrição devida a causas aleatórias, isto é, pequenas, numerosas, independentes, podendo variar em qualquer sentido. No total da fabricação haverá um grande número de peças com uma dimensão intermediária entre valores extremos mais raros. Essa dimensão intermediária constitui o *centro* em torno do qual se coloca o grosso das peças, de acordo com os factores aleatórios. A diferença entre os valores extremos define o *desvio* que traduz a *precisão da máquina* e fornece um meio de aferição da mesma e a *ordem de tolerância* que ela pode ter. A consideração da variabilidade obriga a substituir as tomas unitárias por uma *«amostra»* conjunto de várias peças da qual se retiram os provetes (parte da amostra submetida a ensaio), actuação que conduz ao controle estatístico ou por amostragem.

O *Controle Estatístico* baseia-se no facto de a representação das propriedades do conjunto dos objectos duma fabricação tomar, em geral e sempre que as causas são aleatórias e a população é suficientemente grande, a forma duma curva normal cuja lei de distribuição se ajusta à lei de Laplace-Gauss. Este facto implica a avaliação dessa propriedade por dois números: um que caracteriza a posição da curva, geralmente, expresso pela *média aritmética* — $m = \frac{1}{\varepsilon n_i} \varepsilon n_i x_i$ — e outro que traduz a dispersão dos valores, maior ou menor achatamento da curva, correntemente expresso pelo *desvio pardão* — $\sigma = \frac{\varepsilon n_i (x_i - m)^2}{\varepsilon n_i}$ — que corresponde aos pontos de inflexão da curva. Assim, o valor da referida propriedade deverá ser dado por $m \pm \sigma$ ou $m \pm k \sigma$.

Consideremos, então, uma fabricação cujas tolerências aceitáveis são +D e −D para determinada propriedade e cujos valores medidos na amostra apresentam uma distribuição normal. A posição da respectiva curva pode sofrer certas variações como a Fig. 2 esquematiza.

Se a curva não ultrapassa aqueles valores — curva A — a centragem é perfeita e a dispersão é igual ou inferior a 2 D e traduz uma fabricação *perfeitamente regulada*. Mas se houver uma anomalia ou desregularização a curva pode ser desviada em relação a um dos limites ou mudar mesmo de forma. É o caso da curva B em que certo número de peças à esquerda sai fora do valor admitido, obrigando a rejeitar essas peças embora o afastamento entre os extremos da curva seja o mesmo. A curva C representa o caso mais corrente em que a dispersão dos valores ultrapassa as tolerâncias admitidas para um e outro lado, havendo então peças rejeitadas devido a valores demasiado altos ou a valores demasiado baixos.

O Controle por amostragem implica, portanto certos riscos:

— risco do fornecedor que pode, devido aos resultados obtidos, ver o seu fornecimento rejeitado

— risco do comprador que, pelo mesmo motivo, pode aceitar um lote que deveria ser rejeitado.

Este risco que pode ser calculado é tanto menor quanto maior for a amostra e anula-se para o controle a 100 %. Admitido certo risco, o cálculo estatístico permitirá determinar quantas peças devem ser examinadas e fixar as regras da amostragem.

Este tipo de controle é o único utilizável quando a avaliação das características do produto exige ensaios não destrutivos.

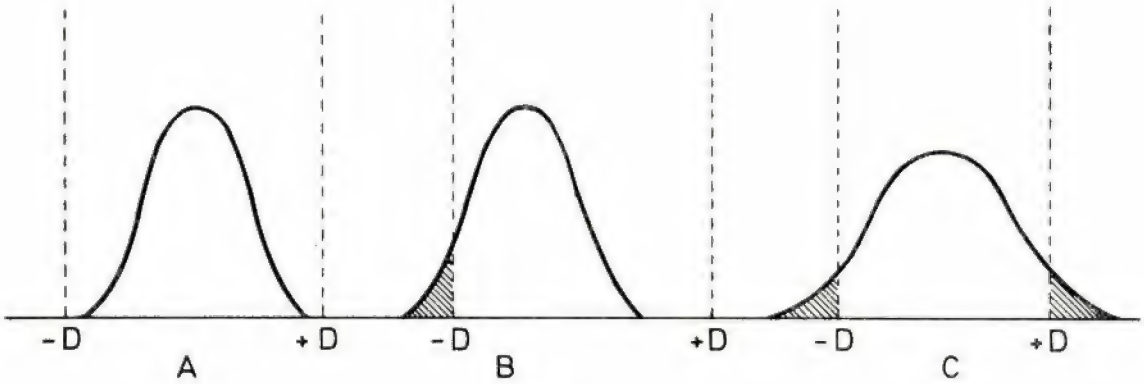


Fig. 2

Exemplos de curvas de distribuição normal

3 — CONTROLE DE QUALIDADE

3.1 — Definição

Das duas noções de Qualidade e Controle nasceu a expressão *Controle de Qualidade* pois o *Controle* é a ferramenta com a qual se atinge a indispensável *Qualidade* por meio de adequada organização e métodos de trabalho.

Controle de Qualidade é então um processo regulador da qualidade dum produto através do qual se avalia o nível de qualidade real, se compara com o exigido pelas especificações ou cadernos de encargos e actua sobre a diferença de modo a obter o produto final com a qualidade desejada. Exerce-se sobre todas as etapas de fabricação e desde a concepção onde deve ser definido o nível de qualidade desejável para cada produto, para cada peça ou cada conjunto. Esse nível de qualidade, fixado em função da utilização e das necessidades do utente e ainda das possibilidades da fabricação, determinará o programa da fabricação que, por sua vez, servirá, por exemplo, de guia na escolha do trabalho afectado a cada máquina segundo as suas capacidades e tolerâncias.

O *Controle de Qualidade* aplicar-se-á a cada etapa e irá eliminando os produtos defeituosos antes de estes serem enviados para nova etapa cujo trabalho seria inútil e desperdiçado. Esta eliminação dará lugar a um abaixamento do preço de custo e é um dos principais objectivos deste *Controle* que tem portanto, um *papel preventivo*. Mas tem também uma *acção dinâmica* visto que controla, ou seja, domina e comanda a qualidade em todas as etapas desde a concepção, realização e utilização dum produto. É de certo modo sinónimo de *Gestão de Qualidade* dada a sua participação na definição, determinação, escolha, verificação e garantia do nível qualitativo dum produto, isto é, a satisfação do seu utilizador.

O papel do Controle de Qualidade na indústria moderna é de primeiro plano, dada a importância real que alcançou, por um lado, devido às exigências cada vez maiores impostas à *Qualidade* e por outro porque o *Controle* se revelou não só indispensável para responder a essas exigências e assegurar a *Qualidade* necessária mas também como um meio eficaz de agir sobre as peças defeituosas, a produtividade, preços de custo e rendibilidade da empresa.

3.2 — Meios

O actual conceito de Controle de Qualidade, que ultrapassa em muito a simples inspecção, exige diversos instrumentos de trabalho a fim de, além dos resultados das medidas e das observações de todas as características que são fundamentais, se poderem interpretar e tirar conclusões que sirvam as operações seguintes. Tal tarefa exige meios apropriados e deve ser realizada por departamentos independentes da fabricação e ligados à Direcção da Empresa, e dispondo de autoridade suficiente, com pessoal escolhido e equipamento adequado. Tal departamento acompanhará o produto ao longo de todo o seu ciclo de vida desde o estudo de mercados até à sua utilização.

Serve-se de meios externos à empresa e de meios internos.

Meios externos — Cabem nesta classificação as normas, especificações oficiais, cadernos de encargos, informações diversas e laboratórios de controle e mesmo de pesquisas fora da empresa, com interesse sobretudo para a pequena empresa.

Meios internos — Estes dependem da dimensão da empresa. No caso da grande empresa incluirão

- — Especificações internas
- — Laboratórios tecnológicos e metrológicos para execução dos ensaios
- — Laboratórios de pesquisa para concepção e melhoria
- — Estatística.

Para concretização das considerações que foram feitas apresenta-se na Fig. 3 um esquema tipo ideal para a fabricação dum produto novo.

CAPÍTULO II

CONTROLE DE QUALIDADE EM PEÇAS DE AÇO TRATADAS TERMICAMENTE

2.1 — Introdução

Consideradas as noções gerais sobre a *Qualidade* e o *Controle de Qualidade* vejamos como se aplicam no caso particular de peças tratadas termicamente.

Uma vez escolhida, de acordo com a pesquisa de mercados, a peça a fabricar há que definir o seu *nível de qualidade*. Este está directamente dependente do emprego a que se destina a peça e será, portanto, função das exigências e solicitações em serviço da mesma. Ainda que o material seja o mesmo, as exigências, pelo menos, serão diferentes consoante o uso da peça. Por exemplo, um dado aço destinado a peças para aeronáutica deverá ter um *nível de qualidade* superior ao desse mesmo aço destinado a uma fabricação corrente.

Conhecidas essas exigências e solicitações deverão então ser fixadas as propriedades consideradas favoráveis ou seja, as *características de qualidade* através das quais se ajuizará posteriormente a *qualidade do aço*.

Essas características, quer qualitativas quer quantitativas, servirão ainda durante a fabricação, juntamente com outras cuja determinação se considere necessária, para estabelecer a *função de qualidade* através dos *índices de qualidade* a que dêem lugar.

É importante não esquecer nunca que a noção de qualidade não pode separar-se da aptidão ao uso

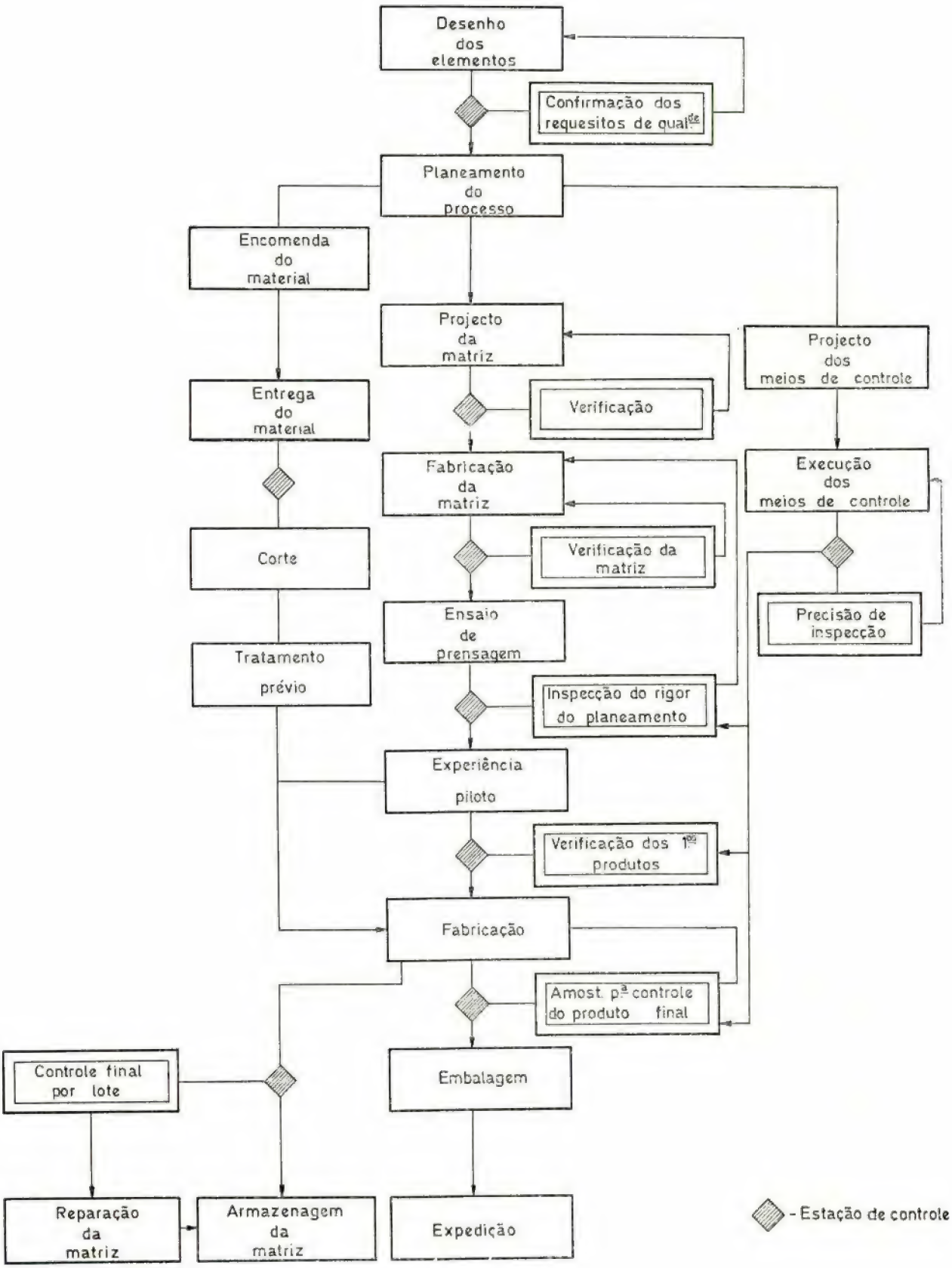


Fig. 3

Diagrama tipo do planeamento de fabricação dum produto novo (2)

da peça e não se poderá falar de «aço de qualidade» sem fazer intervir o modo de utilização. No caso do aço há duas propriedades essenciais para definir a sua qualidade a *tenacidade* e a *ductilidade*, as quais se traduzem por números como tensão de rotura, alongamento, resiliência, estricção e cuja combinação pode fornecer índices de qualidade como

$\sigma_r + 2{,}5\ A$; $\sigma_r + nA$; $\sigma_r \times A$ em que intervem o alongamento ou $\sigma_l = \sigma_r \dfrac{100}{100\text{-}Z}$ em que Z é a estricção e σ_l se define como a «resistência limite» e depende do endurecimento máximo obtido por deformação a frio.

Os primeiros são correntemente usados para os aços-carbono. Estes índices, ou outros, resultantes dos ensaios que se revelem necessários, podem permitir uma classificação e eventualmente uma correlação com os resultados práticos o que exige na maior parte das vezes, a acumulação de resultados de vários ensaios e a sua interpretação com bom senso e inteligência. Esta interpretação sempre difícil é-o ainda mais no caso de dados qualitativos.

É a partir de todos estes elementos que se estabelecem as *normas e especificações de qualidade* das quais dependerá a *Qualidade da Especificação* que orientará o projecto e o planeamento da peça a fabricar.

Outra determinante da Qualidade será a conformidade com o projecto e a continuidade dessa conformidade. Na verdade, não basta que dado perfilado ou certa peça seja apta a dada utilização mas sim que toda e qualquer outra unidade do mesmo fornecimento, ou de fornecimentos seguintes, esteja igualmente apta a ser utilizada. Isto é, é essencial que haja regularidade das fabricações e constância nos fornecimentos das aciarias e fábricas. Exactamente um dos objectivos dos cadernos de encargos e das especificações é assegurar essa constância.

Esta regularidade de propriedades no tempo é tanto mais importante quanto se trate de fabricação de grande massa ou em série. O artesão ou o industrial de pequenas quantidades de peças adapta-se com facilidade à diferença de lote para lote da matéria-prima mas o industrial que trabalha em série tem necessidade dessa regularidade visto que não tem tempo para modificar as suas condições de trabalho cada vez que utiliza um novo fornecimento de material.

Por exemplo, no caso de matérias-primas, diferenças de dureza ou de estruturas, maiores ou menores, podem comprometer a enformação, os tratamentos térmicos ou a capacidade de maquinagem. Igualmente no caso duma peça destinada a fazer parte duma máquina é necessário que as suas dimensões respeitem as tolerâncias prescritas pois o seu não cumprimento pode dar lugar a gripagens ou esforços exagerados com consequências mais ou menos graves, além do prejuízo económico. Do ponto de vista técnico o *Controle de Qualidade* para peças tratadas termicamente incidirá desde a escolha do aço até ao controle do produto final, tendo como fases intermédias o controle da matéria-prima e o controle durante a fabricação.

Para uma melhor caracterização do assunto apresenta-se o esquema da Fig. 4 relativo ao fluxograma duma peça forjada e sujeita a tratamentos térmicos. Nele se encontram as várias fases desde a concepção até à expedição da peça fabricada, estando assinaladas as diversas estações de controle de modo a obter em cada etapa a *qualidade* que garante *no final da fabricação a qualidade técnica da peça e sempre com o nível de qualidade pretendido.*

As estações de controle referem-se a:

1 — Controle da matéria-prima que segue a prática convencional.
2 — Identificação do número de vazamento e verificação da temperabilidade.
3 — Verificação do n.º do vazamento.
4 — Controle de dimensões, volume e secção transversal.
5 — Controle da temperatura.
6 — Controle de dimensões, forma e superfície de acordo com as normas. Lubrificação e vida da matriz, incluindo o registo do seu uso.
7 — Controle de variáveis do processo: tempo de execução, temperatura do forno, gradientes de temperatura e temperatura de refrigeração. É efectuada a dureza para avaliar as qualidades mecânicas.
8 — Verificação de dimensões, estrutura, tamanho do grão, curso das fibras e outras características do produto.
9 — Inspecções finais relativas a dimensões, forma e superfície.
10 — Verificação das qualidades mecânicas pela dureza.
11 — Verificação das dimensões da matriz.

Estas estações podem, de acordo com o nosso objectivo, enquadrar-se do seguinte modo:

Selecção da matéria-prima — Incluida no contrato de aquisição da matéria-prima.
Controle da matéria-prima — 1, 2 e 3.
Controle da fabricação — 4, 5, 6 a 9, em particular 7.
Controle do produto final — 10.

Vamos agora fazer algumas considerações sobre cada uma destas rubricas relativamente ao controle de peças tratadas termicamente.

2.2 — Selecção da matéria-prima

A selecção do aço para ser correcta é difícil e complexa. Se classificarmos os aços, com base no

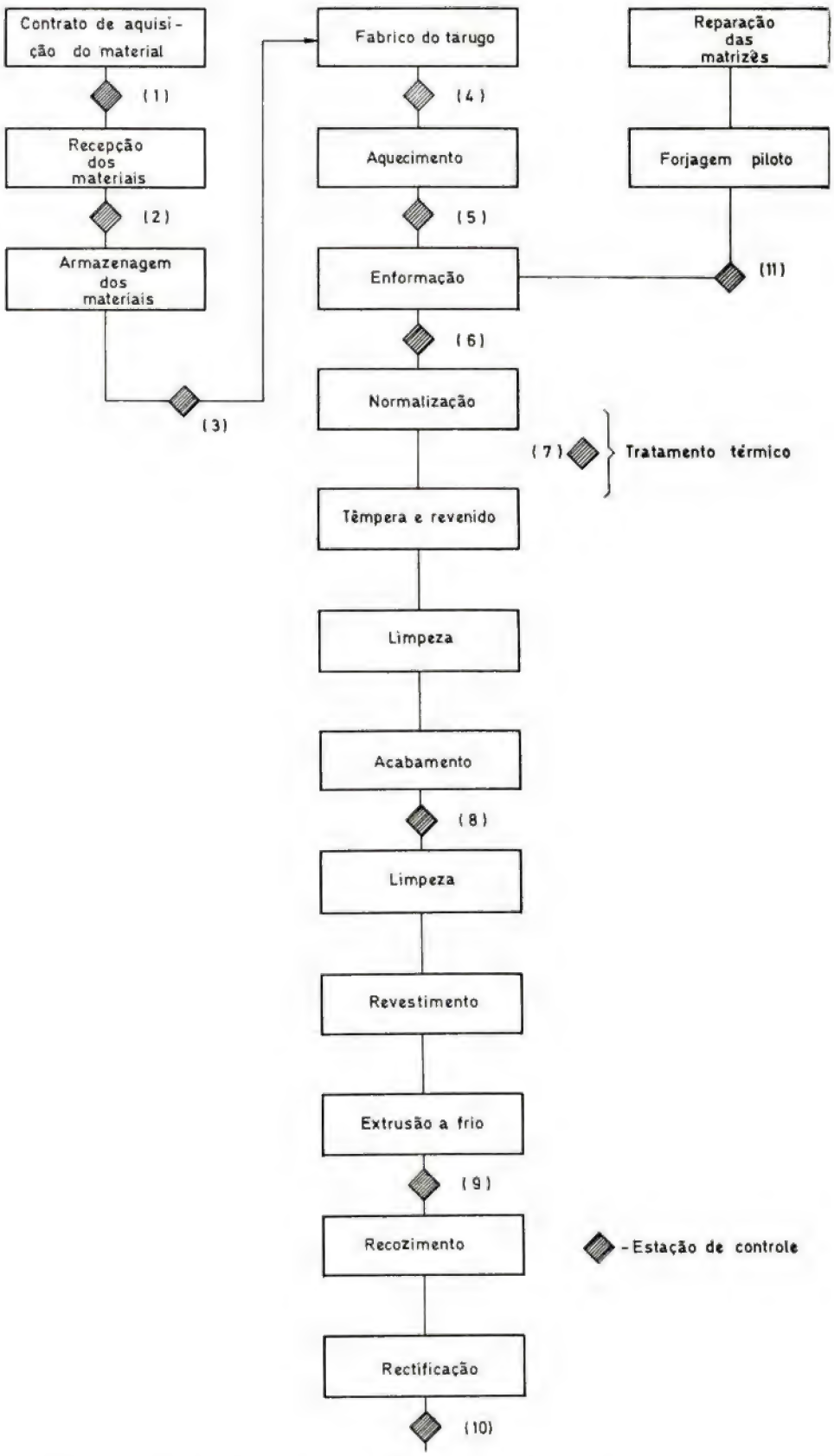


Fig. 4
Esquema de fabricação duma peça forjada e tratada termicamente e seu controlo de qualidade

limite de elasticidade, em aços correntes, aços de alta resistência, aços de muito alta resistência e ultra-alta resistência, Fig. 5, vemos que os aços destinados aos tratamentos térmicos convencionais são os de alta resistência e alguns de muito-alta resistência; nos restantes obtêm-se os elevados limites de elasticidade à custa de tratamentos térmicos e mecânicos especiais como a Fig. 6 indica. Iremos apenas focar os condicionamentos exigidos à matéria-prima — aço — destinada a tratamentos térmicos convencionais, ou seja, aços-carbono e aços fracamente ligados.

De acordo com a especificação francesa NF-A 02-005 — «Designation conventionelle des aciers non alliés aptes au traitemente thermiques et aciers alliés» [5], entende-se por aços especiais para tratamento térmico *«os aços que são, em princípio, destinados a não ser utilizados senão depois de ter sofrido um tratamento térmico a fim de lhes conferir, através de certa estrutura, características precisas correspondentes às suas condições de emprego»*.

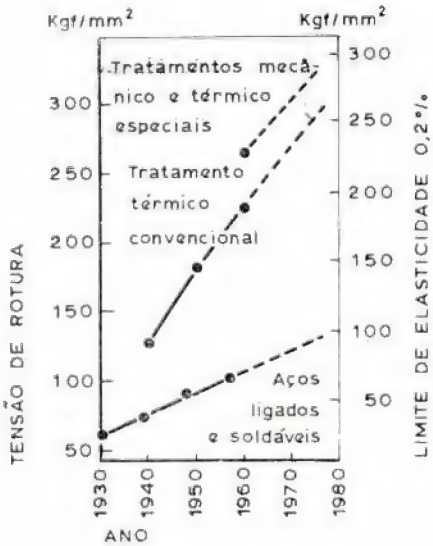


Fig. 6

Resistência de aços de baixo e médio teor em elementos de liga consoante os tratamentos térmicos e mecânicos

A selecção do aço deverá ser feita atendendo às *características exigidas* pelas solicitações a que o material vai estar sujeito, pelos *condicionamentos de fabricação*, garantias de *uniformidade* dos fornecimentos e pelo *preço de custo*.

Os dois primeiros factores são a base da definição do *tipo* e do *estado de entrega* do aço; os dois últimos estão relacionados com a maior ou menor dificuldade de execução das operações mecânicas ou térmicas durante a fabricação e o teor em elementos de ligas existentes. Assim, um aço barato pelo seu custo intrínseco pode sair caro se a facilidade de enformação, fissuras de têmpera, necessidade de excessiva precisão na temperatura das diversas operações para se evitarem estruturas defeituosas, etc., der lugar à obtenção de elevado número de peças a ser rejeitadas. Há pois toda a conveniência em dispor-se duma variedade de aços suficientemente ampla de modo a poder escolher-se o *tipo* de aço mais favorável ao objectivo pretendido.

Nos países altamente industrializados os grandes consumos permitem multiplicar os tipos de aços disponíveis ou correntes, fabricando séries de composição com variação escalonada de um ou dois elementos o que permite uma boa aproximação da solução ideal requerida. Mas em países pouco industrializados tal não é possível dada a necessidade de rendibilidade das aciarias que impõe uma limitação dos tipos de aço. Donde a necessidade destes tipos serem escolhidos o mais cuidadosamente possível para que possam enfrentar todos os problemas que aparecem na indústria mecânica. Dão-se a seguir algumas indicações de utilização de vários tipos de aço consoante o uso a que se destinam.

1 — No caso geral, em que o material deve suportar esforços determinados sem sofrer deformações plásticas nem rotura como veios de transmissão, cambotas, bielas, peças de ligação, suportes, e em geral, todas as peças qualificadas como de resistência, utilizam-se aços de médio teor em carbono (0,30-0,60 %) temperados e com revenidos altos (550°/650° C) — *Aços de alta resistência.*

2 — Para peças que devam ser capazes de se deformar elasticamente num grande domínio de modo a absorver uma energia importante como molas, flechas, cordas de piano, etc. usam-se aços de alto teor em carbono (0,60/0,80 %) temperados e com revenido alto ou aços de médio teor em carbono (0,40/0,60 %) com revenidos médios (350/500° C) — *Aços de alto limite de elasticidade.*

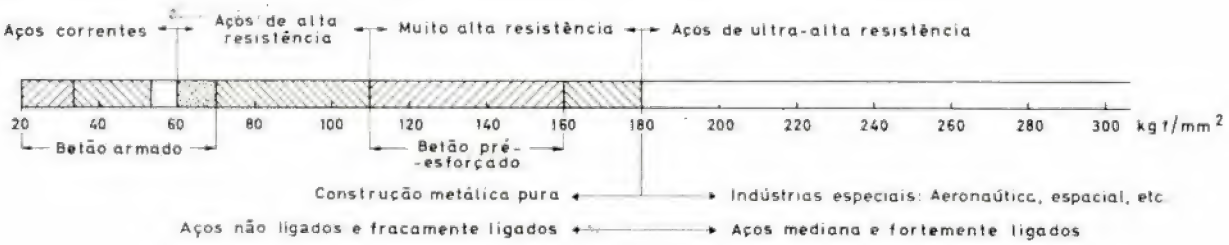


Fig. 5

Classificação esquemática de aços de construção com base no limite de elasticidade [4]

3 — Em peças cuja superfície deve apresentar propriedades particulares como resistência ao atrito exigida em eixos, cilindros de motor e em todas as peças que devam suportar desgaste utilizam-se aços para cementação, isto é, de baixo teor em carbono (0,00 % a 0,15 %) ou aços-carbono de maior teor em carbono para têmpera superficial.

Estes três grandes grupos resumem as necessidades que, dum modo geral, podem aparecer numa construção mecânica corrente, ou seja, satisfazer o triplo aspecto referido: tenacidade, elasticidade e desgaste. É claro que o aço deve satisfazer em primeiro lugar a certa tenacidade e depois às outras duas características.

Desde que as dimensões das peças o consintam em qualquer dos casos se podem utilizar *aços-carbono;* caso contrário há que escolher aços ligados pois a temperabilidade destes é muito mais elevada e permitem uma boa combinação de características de tenacidade e ductilidade à custa duma microestrutura de martensite revenida.

Assim os *aços de alto limite de elasticidade* são, em geral, do tipo Cr-Ni-Mo ou Cr-V ou de alto teor em carbono, silício e manganês; *os aços de alta resistência* são aços de 0,25 a 0,40 % de carbono e ligados com Ni, Cr e Mo de diversos teores de modo a conseguirem-se diferentes temperabilidades e estarem ou não sujeitos à fragilidade Krupp. Não se empregam em geral para $\sigma_r < 130$ daN/mm².

Os aços para *tratamentos termoquímicos* devem ser susceptíveis de endurecer superficialmente por comentação e têmpera de modo a oferecer uma alta dureza superficial e boa tenacidade no núcleo. São em geral aços macios e extramacios e muitas vezes ligados, como os destinados à nitruração, com Al, Cr, Mo e V.

O Quadro 3 resume alguns dos tipos de aço ligados e não-ligados especificados pela AFNOR (França), DIN (Alemanha), SAE e AISI (E. U.) e BS (Inglaterra) que se destinam a ser tratados termicamente. A obediência às características das especificações dará lugar a uma garantia de resposta aos tratamentos térmicos.

2.3 — Controle da matéria-prima

Uma vez seleccionada a matéria-prima e estabelecidos os contratos de compra e recepção há que realizar o controle da mesma, isto é, verificar se ela obedece às especificações prescritas no contrato. A maior ou menor amplitude do controle depende não só da natureza do material e fim a que se destina mas também, e muito principalmente, da reputação do vendedor e, consequentemente, da qualidade técnica do produto fornecido, da constância das características e informações complementares que acompanhem o *processo de elaboração* (série de operações que precedem e compreendem a solidificação do metal) e o *processo de fabricação* (série de operações desde a solidificação do metal até à entrega do produto). Os ensaios de recepção, verificando se os resultados estão dentro dos limites especificados, servem para garantir essa qualidade. Todavia, como os ensaios são caros, lentos e delicados uma garantia de qualidade por parte do fabricante é muito importante pois reduz esses ensaios apenas aos essenciais. Essa garantia existe desde que o fabricante tenha um Controle de Qualidade que verifique cada vazamento a fim de determinar não só a sua classificação qualitativa mas também as características de aplicação. Deste modo cada vazamento é fornecido com um certificado de qualidade em que se assinalam as particularidades do mesmo, como os valores de temperabilidade, dureza potencial de revenido, tratamentos recomendáveis, têmperas possíveis, espessuras máximas de emprego em diferentes condições de estrutura, valores representativos ou características mecânicas para cada espessura do material temperado e com diferentes revenidos.

Deste modo o comprador pode indicar as suas necessidades com precisão e segurança e pode ter uma garantia de boa selecção e escolha do aço sem necessidade de executar os ensaios de comprovação.

No caso do controle da matéria-prima haverá, então, uma de duas posições a tomar:

— execução dum programa total de ensaios de recepção;

— aceitação contra o certificado de qualidade ou execução apenas dos ensaios considerados essenciais no caso do fabricante oferecer garantia da qualidade técnica.

Um programa total de ensaios de recepção consiste de ensaios de *verificação de qualidade* — análise química e características mecânicas — e ensaios de *comprovação e valorização* — temperabilidade, defeitos, forjabilidade, soldabilidade, etc. — os quais aumentam a confiança no produto.

Pela análise química determinam-se todos ou apenas alguns dos elementos que entram na composição e que sejam necessários e/ou suficientes para definir o tipo do aço do ponto de vista de composição global. Ainda nalguns casos de determinação as impurezas que deverão encontrar-se dentro dos limites especificados.

Se consultarmos algumas das normas estrangeiras sosbre o assunto veremos que na AFNOR AO3-115 — «Conditions générales techniques de livraison pour l'acier» [6] para os aços-carbono apenas se determinam o C, S e P, estes 2 últimos elementos limitados a um máximo de 0,040 % ou 0,038 % e o primeiro a uma faixa de tolerâncias mais ou menos larga consoante se trata de aços da série CC ou XC, esta para peças de qualidade particular. No caso dos aços ligados a análise química consta dos elementos habituais e dos elementos de adição que definem o tipo de aço.

Aquela especificação exige um certificado que acompanha a análise. A análise deve ser feita no

QUADRO III

Correspondência de aços ligados e não ligados para tratamentos térmicos

FRANÇA NF A 35-551 a NF A 35-552 (1972)	ALEMANHA DIN 17200 (1969) DIN 17210 (1969) DIN 1722	ESTADOS UNIDOS (SAE-AISI) (1972)	INGLATERRA (BS) (1407, 1423, 1429 e 1449)
	AÇOS CARBONO		
XC 10	CK 10	1010	
XC 12		1012	
XC 18	CK 15	1017	
XC 25	CK 22	1025	
XC 32		1030	
XC 38	CK 35	1038	
XC 42		1042	
XC 48	CK 45	1045	En 43 B
XC 55	CK 55	1055	En 43
XC 65	CK 60	1065	En 42 B ou En 42 F
XC 70	(Cf 70) (*)	1070	
XC 80		1080	En 42 e En 42 j
	UF 100	1095	En 44
	AÇOS MANGANÊS E MANGANÊS-CRÓMIO		
20 M5	(28 Mn 6) (*)	1518	
35 M5	(40 Mn 4) (*)	1536	
16 MC 5	16 Mn-Gr 5		
20 MC 5	20 Mn-Gr 5		
20 MF 4		1118	En 202
	AÇOS SILÍCIO-CROMIO-MOLIBDÉNIO		
	DIN 17221 (1955)		
45 S7	46 Si 7		
55 S7	55 Si 7	9255	En 45
60 SC 7	67 Si Cr 5		
45 SCD 6			
	45 Cr-Si 93		En 52
	AÇOS CRÓMIO		
	15 Cr 3	5015	En 206
38 C2	38 Cr 2		
42 C2	46 Cr 2	5046	
32 C4	34 Cr 4	5132	
38 C4	37 Cr 4	5135	
42 C4	41 Cr 4	5147	
50 C4		5147	En 48
100 C6	(100 Cr 6) (*)	E 52100	
	AÇOS CROMO-MOLIBDÉNIO		
18 CD4			
25 CD4	25 Cr-Mo 4		
30 CD4		4130	
35 CD4	34 Cr-Mo 4	4135	
42 CD4	42 Cr-Mo 4	4142	
30 CD12	31 Cr-Mo 12 (DIN 17221)		En 40
	AÇOS CRÓMIO-VANÁDIO		
50 CV4	50 Cr-V4	6150	En 47
	AÇOS NÍQUEL CRÓMIO		
10 NC 6			
16 NC 6	15 Cr-Ni	3115	
20 NC 6		3120	
35 NC 6		3135	
14 NC11			
30 NC11			
	28 (36) Ni-Cr 6 (1662)	3135	En 111
	AÇOS NÍQUEL CRÓMIO MOLIBDÉNIO		
15 NCD 2		8615	En 361
20 NCD 2		8620	En 362
40 NCD 3			
16 NCD 5			En 352
18 NCD 6	17 Cr-Ni-Mo 6	4137	En 354
35 NCD 6	34 Cr-Ni-Mo 6	4137	En 110
35 NCD16			
	36 Cr-Ni-Mo 4		En 100
	AÇOS CRÓMIO ALUMÍNIO MOLIBDÉNIO		
	DIN 17211 (1970)		
30 CAD 6-12	34 Cr-Mo-Al 5		En 41 A
40 CAD 6-12	41 Cr-Mo-Al 7		En 41
	AÇOS CRÓMIO-NÍQUEL-MOLIBDÉNIO		
30 CND8	30 Cr-Ni-Mo		
		4320	En 325
	AÇOS DE CORTE		
NF A 35-562	DIN 1651 (1970)		
10 Pb2			
20 Pb2			
35 Pb2			
10 F2	10 S 20	1108	
20 F2			
12 MF4		1 116	
35 MF4		1139	
10 Pb-F2	10 S-Pb 20	12L13	

(*) Não figuram nas normas DIN mas sim nas «WERKESTO H. BLÄTTER».

momento do vazamento e sobre o produto entregue para verificar se está de acordo com a primeira, tendo em conta os afastamentos devidos, por exemplo, à heterogeneidade do aço e de acordo com a especificação do produto. Podem ainda ser feitas análises complementares para confirmação de não satisfação e análises de arbitragem a efectuar segundo condições acordadas entre as duas partes interessadas.

As especificações ASTM procedem identicamente, exigindo que a análise de cada vazamento acompanhe o produto e que seja efectuada a análise sobre uma amostra deste para verificar se está conforme o especificado para o tipo de aço considerado.

Relativamente aos *ensaios mecânicos* as especificações apresentam para cada aço os valores que devem ser alcançados pela resistência à rotura, alongamento e resiliência após têmpera e revenido adequado ou num certo estado de referência. Assim, por exemplo, um aço de $\sigma_r = 73$ a 113 daN/mm² deverá dar, no estado de referência, $A_{min} = 11$ % e $\rho_{min} = 6$ daJ/cm² para ser aceitável. Os valores das tabelas são valores limites e não de utilização. As normas ou especificações relativas a este assunto devem referir, além do estado em que se encontra o produto — recozido, temperado e revenido, etc. —, o modo de obtenção e execução dos provetes, o tipo de ensaio, método de realização e validade do mesmo.

Por exemplo, a especificação ASTM A 231-68 — «Chrominum-vanadium alloy steel spring wire» se o varão for entregue no estado recozido e estirado a frio pode verificar-se apenas o valor da dureza; mas quando for entregue temperado e revenido em óleo deve verificar-se se a resistência à tracção e a estricção estão dentro dos limites fixados.

Quanto aos ensaios chamados de *comprovação e valorização* que asseguram maior confiança numa dada qualidade do aço, detectando pequenas diferenças em certas propriedades, os ensaios de temperabilidade e dureza potencial de revenido são os que particularmente nos interessam. Estes ensaios permitirão esclarecer se o aço é ou não realmente o pretendido para o fim em vista. Isto não quer dizer que se os resultados dos ensaios forem inferiores aos previstos, o aço seja inútil, mas apenas que não servirá para aquele fim. A especificação ASTM — A 304-70 — «Alloy Steel Bars Subject to End — Quench Hardenability Requirements» [8] compila uma série de resultados de temperabilidade, sendo a referência dos aços adicionada da letra H (hardenability) para símbolo de garantia.

Também, segundo as normas francesas, os aços XC dão maior garantia de temperabilidade e os aços cujas referências forem seguidas das letras TS serão particularmente adequados a tratamentos de superfície.

Podem ainda ser efectuados outros ensaios relativos a:

— Descarbonização superficial
— Pesquisa de fissuras e defeitos diversos
— Exame do estado de superfície (sobretudo em aços destinados a molas)
— Microestrutura em produtos destinados directamente a tratamentos térmicos
— Tamanho de grão
— Inclusões
— Tolerâncias dimensionais

Deve ser sempre elaborado um *certificado* e um *processo de recepção*. O *certificado de recepção*, assinado pelo recepcionário escolhido pelo cliente (pode ser da fábrica, do vendedor ou outro), conterá os resultados de todos os ensaios prescritos e atesta que estes ensaios foram efectuados pelo produtor sobre amostras retiradas de entre os produtos entregues.

Se o certificado de recepção, por convenção particular, for assinado pelo produtor e pelo recepcionário, toma o nome de *processo de recepção* e deve referir os seguintes assuntos:

— Lugar da recepção — Modo de fraccionamento do fornecimento para os ensaios de recepção — Direitos do recepcionário — Condições de recepção	por vazamento por vazamento e TT na fábrica por lote (vazamentos diferentes ou fabricações diversas)

O produto estará em condições de ser aceite quando todas as condições impostas no contrato de aquisição forem satisfeitas. No entanto, matérias-primas que não satisfaçam inteiramente ao estabelecido poderão, conforme o caso, ser aceites pelo utilizador se este considerar que não são prejudiciais ao produto a fabricar quer quanto às operações de fabricação quer quanto ao uso a que se destina.

2.4 — Controle da fabricação

Este Controle pode ser feito, como vimos, ou só pelo fabricante ou com interferência do comprador conforme for estipulado no contrato respectivo.

Quanto à sua execução, ela deve efectuar-se por etapas de modo que no fim de cada uma delas o produto seja considerado como matéria-prima da etapa seguinte. Quanto mais apertado for este controle mais cedo se detectarão as deficiências e evitará dispendidos com peças que só num exame final iriam para o refugo. Este modo de proceder, evitando operações caras com a maquinagem, tornará o preço de venda mais baixo.

Os meios de controle serão diferentes de etapa para etapa e conforme a peça, como a Fig. 4 patenteia nas estações 4, 5, 6, 7, 8 e 9.

Este controle é exercido, por um lado, sobre o processo de fabrico e, por outro, no produto propriamente dito. No caso de peças tratadas termicamente salientam-se as medidas de temperatura de fornos e de banhos e o controle da natureza e pressão das atmosferas dos fornos e medidas de tempo.

No produto o controle pode ser feito peça a peça ou sobre uma amostra que vai acompanhando o processo de fabrico. A característica que, em geral, serve

para este controle é a dureza e algumas vezes o tamanho de grão pelo aspecto da fractura.

As temperaturas dos fornos para tratamentos térmicos e as temperaturas de banhos de arrefecimento devem ser controladas cuidadosamente. As primeiras avaliam-se por meio de pirómetros, em geral, de termopares e a dos banhos com um termómetro vulgar pois as temperaturas a avaliar não deverão ir além dos 80° C. Correntemente as temperaturas dos fornos são reguladas automaticamente e no caso de fornos de indução de alta frequência têm servo-controles que são de confiança desde que a carga se mantenha constante. Estes fornos têm de estar equipados com acessórios de segurança contra mudanças de carga repentinas. Estes aparelhos devem ser controlados com frequência pelo responsável do Departamento de Qualidade. Um outro controle a que a peça pode ser submetida durante a fabricação é o controle dimensional e do aparecimento de defeitos.

2.5 — Controle do produto final

Este controle pode igualmente ser realizado peça a peça ou sobre amostras retiradas segundo uma regra pré-determinada. Depende essencialmente do *nível de qualidade* exigido à peça.

Do ponto de vista de fabricação o controle de cada lote terá dois objectivos:

1 — Qualificar esse lote
2 — Fornecer informações sobre o estado das ferramentas antes de voltarem a servir.

Novamente, as normas e as condições de recepção impostas pelo comprador ou fornecidas pelo fabricante estão na base dos ensaios e exames a efectuar.

No que se refere, em particular, aos tratamentos térmicos os ensaios de controle específicos são a dureza e a apreciação do grão por fractura. Se necessário, realizar-se-ão ainda micrografias para verificação das propriedades exigidas e ensaios não destrutivos para detecção de defeitos de superfície, internos ou reparações.

São também importantes os ensaios de comportamento do produto em que se submete este a um ensaio cujos esforços aplicados traduzem as solicitações em serviço. É o caso do ensaio de deflexão para molas de folhas ou de compressão no caso de molas helicoidais.

É também importante, num grau que varia com o destino da peça, o controle dimensional.

Os resultados destes ensaios farão parte do *certificado de qualidade* que o fabricante deve enviar juntamente com o fornecimento do lote respectivo. Por exemplo, as normas NF A 35-71 — «Acier spéciaux pour ressorts» [9] e BS-24 Part. 1: 1956 — «Axles, Railway, Rolling Stock Material» [10] e a especificação ASTM A-147-51 — «Heat-treated Steel Leaf Springs» [11] especificam para os respectivos produtos os resultados que se devem obter.

A peça adequada para uso ou seja a *peça de Qualidade*, na acepção actual, é, portanto, o resultado de inúmeros esforços e factores que envolvem várias etapas desde a concepção até à assistência ao utente.

Todo esse conjunto de actividades será tanto mais eficaz quanto maior for a conscencialização existente sobre a importância dum *Controle de Qualidade* cujo significado máximo é traduzido pela *Marca de Qualidade*. A instituição da Marca de Qualidade, garantindo a *Qualidade do Produto*, traz para o consumidor e, consequentemente, para o seu país grande economia por duas razões fundamentais:

1 — Eliminação do controle de recepção
2 — Confiança e rendibilidade da peça em serviço.

BIBLIOGRAFIA

[1] NF-X06 — 011 — «Définition, choix et spécification de la qualité d'une fourniture».

[2] **Juran, J. M. et al.** — «Quality Control Handbook» Sec 2 e 35, Mc Graw Hill Company, New York 1974.

[3] **Colombier, L.** — «Le contrôle de la fabrication et de la qualité en Métallurgie, Ed Revue de Métallurgie» Paris 1964.

[4] «Aços de alta resistência» Introdução — Memória LNEC 305.

[5] **NF-A02 — 005** — «Désignation conventionnelle des aciers non alliés aptes au traitement thermique et des aciers alliés».

[6] NF-A03 — 115 — «Conditions génerales techniques de livraison pour l'acier».

[7] ASTM-A 231-68 — «Chromium — Vanadium alloy steel spring wire».

[8] ASTM-A 304-70 — «Alloy Steel Bars Subject to End-Quench Hardenability Requirements».

[9] NF-A35.571 — «Aciers spéciaux pour ressorts».

[10] B.S.24 Part 1:1956 — «Axles Railway, Rolling Stock Material».

[11] ASTM-A147-51 — «Heat — Treated Steel Leaf Springs».

NF-X-05-020 — «Terminologie du controle de la qualité des produits industriels».

NF-X-06-021 — «Controle Statistique de la fabrication».

ISO/R 404-1964 — «Acier et produits sidérurgiques — Conditions générales technique de livraison».

C. D. U. 621.762:669.1

Pulverometalurgia de ligas ferrosas

CARLOS ALBERTO PACHECO DA SILVA (1)

RESUMO

Após se realçar o interesse da pulverometalurgia como tecnologia alternativa de enformação, faz-se uma breve descrição das etapas do processo e o modo como podem influenciar as propriedades.

Referem-se finalmente os tipos de ligas ferrosas mais frequentemente produzidas por pulverometalurgia.

ABSTRACT

After emphasizing the interest of powder metallurgy as an alternative technology of metal forming, the steps of the process are described together with the way they influence the properties.

Finally the more usual ferrous alloys produced by powder metallurgy are referred.

1 — INTRODUÇÃO

A Pulverometalurgia constitui o ramo da Metalurgia que envolve os processos de fabricação de objectos partindo de pós metálicos.

Uma técnica muito similar à actual pulverometalurgia constituiu o primeiro método de obtenção da maioria dos metais, quando as técnicas conhecidas não possibilitavam alcançar temperaturas suficientemente elevadas para os fundir. Os minérios eram reduzidos, no estado sólido, com carvão vegetal, obtendo-se um material metálico, de consistência pulvorolenta, que era em seguida compactado por martelagem a quente. Foi deste modo que o homem começou por obter o ferro, tendo algumas peças subsistido até aos nossos dias, dentre as quais, o exemplo mais espectacular é o Pilar de Delhi, peça pesando cerca de 6 toneladas e datada de cerca de 300 anos d. C.

Sucedia, no entanto, que estas técnicas rudimentares iam sendo substituídas por processos de fusão e vazamento, logo que se tornava possível atingir temperaturas que permitiam fazê-lo. Entretanto, outros materiais, de mais elevada temperatura de fusão iam surgindo, repetindo-se as situações; platina em 1827, ósmio em 1870, tungsténio em 1910 e carboneto de tungsténio-cobalto em 1914-1927.

Modernamente a tecnologia de altas temperaturas permite fundir todos os materiais conhecidos, incluindo o de temperatura de fusão mais elevada (carboneto de háfnio a cerca de 4000° C), pelo que as razões da utilização da pulverometalurgia não se devem actualmente à impossibilidade de fundir os materiais, mas a vantagens que esta oferece em relação a outras tecnologias metalúrgicas.

A pulverometalurgia moderna deve o seu arranque aos trabalhos dos Russo Sobolevsky e Inglês Wollaston que em 1827 prepararam platina por sinterização, no estado sólido, de pó desse metal.

A pulverometalurgia de ligas ferrosas iniciou-se por volta de 1920, para a produção de corpos porosos autolubrificados, enquanto que só por volta de 1936 se iniciou a produção de peças em ligas ferrosas e não ferrosas, substituindo as obtidas por outras tecnologias de enformação de metais; o grande incremento da pulverometalurgia verificou-se a partir da década de 50.

Actualmente a pulverometalurgia é utilizada com um dos seguintes objectivos:

i) Produção de materiais cuja composição ou microestruturas os torna difíceis ou impossíveis de produzir por via alternativa.

São exemplos deste caso a produção de pseudo-ligas de tungsténio-prata e tungsténio-cobre para contactos eléctricos de alta-tensão, cermetes de carboneto de tungsténio-cobalto, dispersões de óxidos em matrizes metálicas (Alumina-alumínio), etc.

Neste caso, a forma a obter não é de grande importância, acontecendo mesmo que, por vezes, se obtêm formas intermé-

(1) Assistente Especialista de 2.ª do Laboratório de Física e Engenharia Nucleares — Lisboa.
Assistente do Instituto Superior Técnico.

Comunicação apresentada ao Congresso da Ordem dos Engenheiros, Lisboa, Novembro 1977.

dias a partir das quais as peças são maquinadas.

ii) Produção de peças possíveis de obter por via alternativa, mas para as quais, devido a particularidades da sua forma a produção por via pulverometalúrgica apresenta vantagens económicas.

Deste grupo faz parte o grande volume de actividade da pulverometalurgia de ligas ferrosas, produzindo componentes de formas complexas para as indústrias automóvel, motociclos, bicicletas, electrodomésticos, motores, etc. Neste aspecto, a pulverometalurgia é essencialmente uma tecnologia de enformação de metais e como tal competitiva com a fundição, a estampagem, a maquinação, etc.

iii) Produção de peças não só de formas adequadas a uma utilização económica da pulverometalurgia, mas apresentando também propriedades especialmente conferidas por este processo. É tipicamente o caso das peças autolubrificadas e dos filtros metálicos; aqui se faz uso da presença de porosidade que normalmente acompanha as peças produzidas a partir de pós, a qual, no caso das peças autolubrificadas, é preenchida com um lubrificante sólido ou líquido.

É pois evidente que a pulverometalurgia encontra um vasto campo de aplicações, quer como tecnologia específica, quer como tecnologia alternativa. Reportando-nos unicamente a este último aspecto, dado nele se situar a pulverometalurgia das ligas ferrosas, é interessante referir alguns dados estatísticos e previsões relativas à actividade deste sector da indústria, inexistente em Portugal. Segundo dados publicados pela Metal Powder Industries Federation (MPIF), organismo que nos E. U. A. reúne os industriais deste sector, em 1971, o consumo de pó de ferro destinado à produção de peças sinterizadas foi de cerca de 85 mil toneladas, representando 75 % da produção total de pó de ferro; os restantes 25 % destinaram-se a outras aplicações com particular relevo para a soldadura, corte e indústria electrónica.

No quadro I estão indicados valores mais completos publicados pela MPIF e relativos ao consumo, nos E. U. A., de pós de ferro e de outros metais nos anos de 1967 a 1972. É aparente, da análise deste quadro, o grande incremento que o consumo de pó de ferro destinado à produção de peças sinterizadas, apresentou neste espaço de tempo. Os principais polos de consumo de peças sinterizadas nos E. U. A. estão indicados no quadro II, ainda de acordo com valores apresentados pela MPIF. É de salientar, deste quadro, o enorme mercado que a indústria automóvel representa para a pulverometalurgia. Embora em percentagem este consumo tenha diminuído, de cerca de 60 % em 1965, para perto dos 50 % em 1973, em valores absolutos, o consumo quase que duplicou (42 600 ton. em 1965 para 81 850 ton. em 1973). A distribuição das peças pelas diferentes partes do automóvel, era em 1965 a apresentada no quadro III.

QUADRO I

Consumo de pós metálicos nos E. U. A. (em toneladas)

	1967	1968	1969	1970	1971	1972
Ferro total	85 258	102 038	115 098	103 942	116 000	140 041
Ferro P/M	57 123	69 386	80 568	71 720	84 684	107 832
Alumínio...	93 067	110 327	110 241	76 943	58 732	82 122
Tungsténio	4 194	4 018	5 157	4 970	3 648	4 614
Molibdénio	698	862	1 197	1 016	1 125	1 596
Níquel	—	2 712	2 517	2 816	2 444	4 380
Cobre...	25 396	28 208	27 446	21 541	23 845	24 471

QUADRO II

Consumo de peças sinterizadas, em ligas ferrosas e não ferrosas, por tipos de mercado, nos E. U. A.

	1965		1970		1972		1973	
	(t)	(%)	(t)	(%)	(t)	(%)	(t)	(%)
Automóvel	42 600	60	40 050	45	62 520	49	81 850	51
Utensílios	11 360	16	16 020	18	17 860	14	22 470	14
Jardinagem e ferramentas utilitárias ...	7 100	10	15 130	17	22 970	18	28 890	18
Máq. escritório...	4 260	6	7 120	8	7 660	6	8 020	5
Lazer e desportos	3 550	5	5 340	6	10 210	8	14 450	9
Outros	2 130	3	5 340	6	6 380	5	4 820	3
Total	71 000		89 000		127 600		160 500	

QUADRO III

Aplicações de peças sinterizadas na indústria automóvel, no ano 1965

Motor	35 %
Suspensão	24 %
Transmissão	22 %
Direcção	12 %
Chassis	5 %
Parte eléctrica...	2 %

Com a introdução de novas técnicas de pulverometalurgia, em particular o uso da técnica de forjagem de pré-formas sinterizadas (P/M hot forging), que possibilita um melhoramento apreciável das propriedades mecânicas, permitindo deste modo a produção de peças sujeitas a elevados esforços mecânicos, as previsões do consumo de peças produzidas por pulverometalurgia são bastante optimistas, tal como nos é dado concluir da observação do quadro IV, onde se apontam taxas de crescimento da ordem dos 20 % para a Europa Ocidental, na década de 70.

O enorme interesse manifestado pela pulverometalurgia deve-se às vantagens que esta tecnologia oferece e dentro das quais são de salientar as seguintes:

— Permite ritmos de produção elevados de grandes lotes de peças idênticas;
— Elimina grande número de operações de maquinação;
— Permite obter facilmente tolerâncias apertadas;
— Simplifica ou elimina operações de acabamento;
— Reduz ou elimina os desperdícios de matéria-prima;
— Confere às peças boa resistência ao desgaste, podendo inclusivé produzir peças com propriedades autolubrificantes;
— Permite produzir materiais não obteníveis por outras tecnologias;
— Reduz consideravelmente os consumos de energia.

A pulverometalurgia competitiva apresenta, apesar de tudo algumas limitações importantes, que a tornam inadequada à produção de grandes peças, de pequenas séries, ou de peças sujeitas a elevados esforços mecânicos.

2 — CICLOS DE PRODUÇÃO

O ciclo de produção de uma determinada peça, depende essencialmente das especificações a que esta deve obedecer; quanto mais exigentes estas forem, no que respeita a propriedades mecânicas e tolerâncias dimensionais, mais longo, complexo e dispendioso se torna o ciclo de produção.

Na figura 1 estão representados esquematicamente alguns ciclos de produção, compostos por três tipos de operações elementares:

1 — Operações prévias;
2 — Operações de densificação;
3 — Operações de acabamento.

As propriedades mecânicas das peças sinterizadas são fortemente dependentes da sua porosidade; a aplicação sucessiva de operações de densificação, actuando no sentido da redução da porosidade, conduz a um melhoramento apreciável das propriedades mecânicas.

No entanto, todas as operações do ciclo de produção, têm influência na qualidade do produto final, pelo que, consideramos de interesse, abordar as suas características mais importantes.

QUADRO IV

Consumo estimado de pó de ferro em 1965 e 1970 e previsto para 1975 e 1980

CONSUMO DE PÓ DE FERRO (1 000 t)	Europa Ocidental				América do Norte				Japão			
	1965	1970	1975	1980	1965	1970	1975	1980	1965	1970	1975	1980
Peças sinterizadas...	15	32	50	86	46	72	113	150	3	14	25	41
Forjadas a partir de pó...	—	—	18	118	—	—	18	109	—	—	16	45
Total...	15	32	68	204	46	72	131	259	3	14	41	86
Componentes para a indústria automóvel:	50	50	55	65	60	50	55	65	45	60	60	65
Quantidade estimada em Kg de peças P/M por automóvel												
Peças sinterizadas...	1.1	1.8	2.4	4.5	3.3	6.3	7.5	11.0	2.2	2.8	4.0	7.0
Forjadas P/M	—	—	0.9	6.5	—	—	1.5	7.0	—	—	2.5	6.5
Total...	1.1	1.8	3.3	11.0	3.3	6.3	9.0	18.0	2.2	2.8	6.5	13.5
Taxa de aumento anual												
Década de 60	14 %				16 %				28 %			
Década de 70	20 %				13 %				21 %			

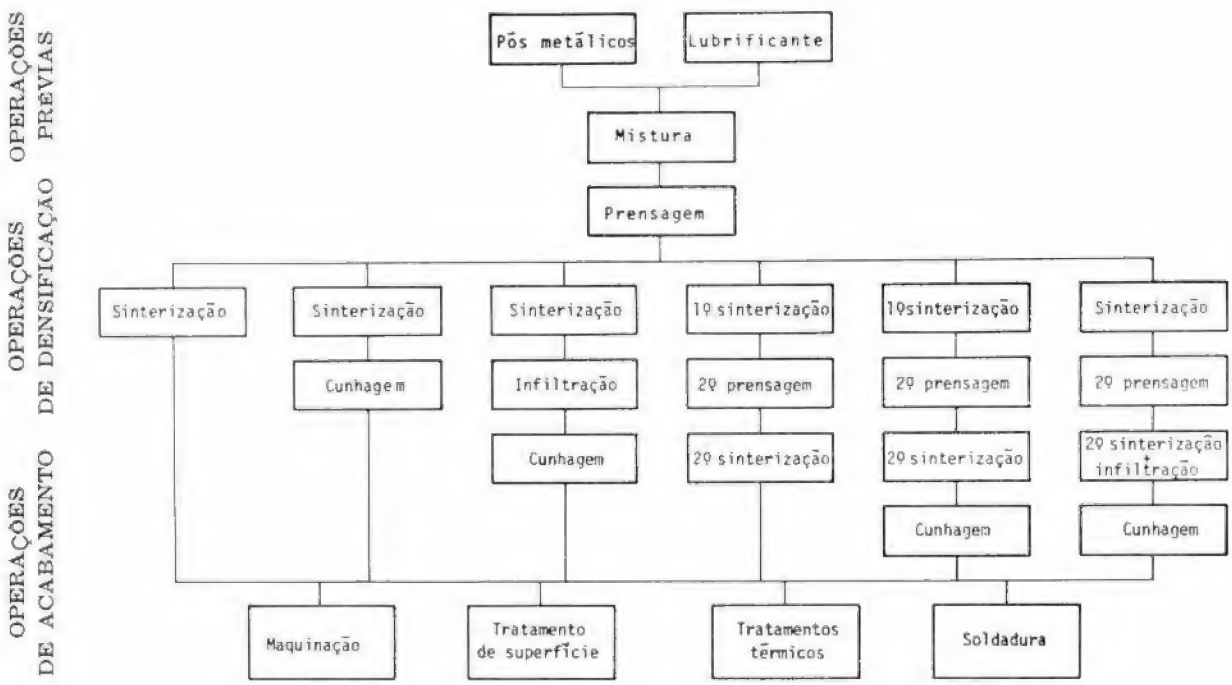


Fig. 1

Ciclos de produção utilizados em pulverometalurgia

3 — OPERAÇÕES ELEMENTARES

3.1 — Produção de pós metálicos

Os diferentes métodos aplicáveis à produção de pós metálicos, com a qualidade requerida para a fabricação de peças sinterizadas, pertencem a um dos seguintes grupos:

— redução;
— deposição electrolitica;
— decomposição de compostos no estado de vapor;
— maquinação e moagem;
— atomização.

Embora todos eles possam ser usados na produção de pós de ferro, os mais aplicados industrialmente são o da redução de concentrados de minérios muito puros (magnetites) com coque, (método Hoganas), ou de carepa siderúrgica com hidrogénio, (método Pyron), e o de atomização de gusas de alto teor de carbono em atmosfera oxidante, seguido de um tratamento térmico de oxidação-descarburação, (método Mannesmann).

Para a produção de pós de elevada pureza, que encontram aplicações muito específicas na pulverometalurgia, são utilizados métodos de deposição electrolítica. As ligas ferrosas são em geral produzidas por atomização (caso dos aços ferramenta, aços inoxidáveis, ligas de ferro-níquel, etc.).

As propriedades dos pós dependem do método da sua obtenção, apresentando-se estes de forma irregular e microporosos no caso dos pós obtidos por redução, dendríticos nos obtidos por deposição electrolítica e esferoides e densos nos obtidos por atomização. Os pós produzidos por redução directa de minérios apresentam um conteúdo, mais baixo de elementos em solução sólida do que os pós obtidos por redução de carepa ou os atomizados, mas em contrapartida o seu teor de inclusões não metálicas é mais elevado. Da consideração das características dos diferentes pós, resulta a escolha do tipo de pó adequado a um determinado fim.

3.2 — Mistura

Através desta operação elementar são adicionados os diferentes elementos de liga, no caso desta ser obtida a partir de pós elementares e simultaneamente agentes de lubrificação, que se destinam a facilitar a operação de prensagem.

O elemento de liga mais importante, nas ligas ferrosas, é o carbono, adicionado na forma de grafite ou negro de fumo, e controlado pela atmosfera do forno durante a sinterização. Outros elementos de liga frequentemente usados são o cobre, níquel, molibdénio, fósforo e enxofre.

O lubrificante, adicionado em quantidades da ordem de 0,5 a 1 %, tem a finalidade de reduzir o atrito entre os partículas do pó e as paredes da matriz, durante a prensagem, possibilitando deste modo uma melhor uniformização da pressão e um menor esforço durante a expulsão da peça da matriz. Os materiais frequentemente usados para este fim são

os estearatos de zinco e lítio, o ácido esteárico, e certas ceras minerais comercializadas com diversos nomes.

A operação de mistura dura cerca de 30 minutos, usando-se misturadores rotativos descontínuos, do tipo de duplo cone.

3.3 — Compactação

A operação de compactação destina-se a conferir à massa de pó a forma pretendida e simultaneamente a dotá-la de resistência mecânica adequada ao seu manuseamento, anterior à sinterização. A densidade da peça compactada deve atingir valores idênticos aos pretendidos para a peça sinterizada, para que as contracções durante a sinterização sejam mínimas; é possível deste modo exercer um controlo bastante efectivo sobre as dimensões finais das peças.

São aplicáveis vários métodos de compactação. O mais frequentemente utilizado, pelos elevados ritmos de produção que permite atingir, com baixos custos operatórios, é o da compactação unidireccional a frio, correntemente designado por prensagem.

Este processo consiste na aplicação de pressão, numa só direcção, à massa de pó contida no interior de uma matriz, por acção de um conjunto de punções móveis. Dada a forma de aplicação da pressão e ao facto de a massa de pó não se comportar como um fluido (não transmite a pressão integralmente em todos os sentidos) este método de compactação apresenta algumas limitações quanto à forma e dimensões das peças a produzir. Não é fácil, por exemplo, prensar peças apresentando furos e reentrâncias normais à direcção de prensagem.

O comportamento de uma massa de pó no interior de uma matriz, quando sujeita à acção da pressão aplicada pelos punções, é ilustrado pelo diagrama da figura 2, que nos mostra que as densidades normalmente praticadas em peças de ferro sinterizadas (6,0 a 6,8 g/cm³) são atingidas para valores da pressão aplicada de 400 a 600 MN/m² (4 a 6 t/cm²), usando pós de ferro reduzidos; valores mais elevados da pressão são de evitar por conduzirem a desgastes maiores das ferramentas de compressão e exigirem prensas de maior capacidade.

A prensagem constitui uma das mais difíceis operações elementares do ciclo produtivo da pulvero-metalurgia e aquela que exige maior experiência, tanto ao nível de projecto dos sistemas de prensagem (conjunto de matrizes e punções) como à própria condução fabril. Pretende obter-se a peça com as dimensões e forma tão próximas quanto possíveis das dimensões e forma finais e com um mínimo de variação de densidade ao longo da peça. Este objectivo nem sempre é fácil de atingir em especial quando se trata de produzir objectos de formas complexas.

Pela incidência que tem na qualidade e nos custos de produção, deve ser dedicada especial atenção ao projecto e fabrico dos sistemas de prensagem. O projecto, normalmente da responsabilidade dos produtores de peças sinterizadas, exige grande experiência, e envolve, por vezes, a construção de matrizes experimentais, em bronze ou ferro fundido, de onde são recolhidos os elementos para o projecto definitivo. O fabrico dos sistemas de prensagem, por envolver técnicas e equipamentos específicos, é frequentemente conduzido por empresas especializadas. No quadro V reúnem-se alguns tipos de materiais usados para o fabrico de matrizes e punções.

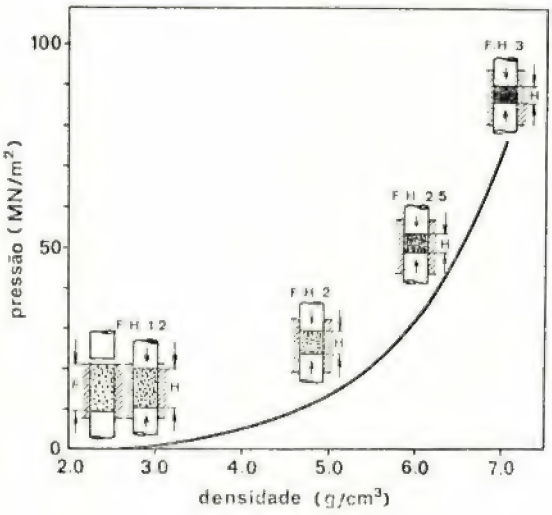


Fig. 2

Variação de densidade de um pó de ferro reduzido, com a pressão aplicada

3.4 — Sinterização

Denomina-se deste modo o processo através do qual a peça prensada (em verde) se transforma num sólido coerente, policristalino, por soldadura das partículas metálicas, a temperaturas inferiores à da sua fusão.

Em consequência, as propriedades mecânicas variam significativamente, passando de um valor médio da resistência à tracção de 5 a 10 N/mm², em peças prensadas a 400-600 MN/m² (4-6 t/cm²), para valores da ordem dos 250 N/mm² em peças de ferro e de 600 N/mm² em ligas ferrosas.

A sinterização é conduzida aquecendo o compactado a uma temperatura situada entre 2/3 e 3/4 da temperatura de fusão (para ligas ferrosas, cerca de 1100° C), durante um tempo suficiente para que, através de diferentes mecanismos de transporte de matéria no estado sólido, se promova uma ligação das partículas do pó, com a consequente formação de estruturas policristalinas.

Quando o compactado é formado por uma mistura de pós de composição diferente, processa-se, durante a sinterização, a formação de ligas, por difusão.

QUADRO V

Materiais típicos para matrizes e punções

Aplicação	TIPO	COMPOSIÇÃO % EM PESO								Dureza Temperado e Revenido RC
		C	Mn	Cr	Mo	V	W	Co	Ni	
Punções	Aços Ferramenta	0,95	1,2	0,5	—	0,1	0,5	—	—	62-50
		0,85	2,1	—	—	0,12	—	—	—	63-50
	Baixa Liga	0,55	—	1,0	0,35	—	—	—	3,0	58-50
Matrizes	Aços de alto teor em crómio	2,1	—	13,0	—	4,0	1,4	—	—	64-61
		2,0	0,7	13,0	—	—	1,4	—	—	65-63
	Aços rápidos	0,8	—	4,5	1,0	1,6	18,5	10,0	—	66-64
		1,25	—	4,1	3,2	3,1	9,0	9,5	—	69-67
	Carbonetos cementados	WC		Co		Dureza RC				
		94-89		6-11		72				

Devido à eliminação dos poros, o processo de sinterização é acompanhado de variação volumétrica, que deverá ser mantida dentro de limites aceitáveis (inferior a 1 %), de modo a possibilitar-se um controlo efiicente das dimensões e forma da peça.

Na prática industrial a sinterização é conduzida em fornos providos de atmosfera controlada, dada a grande afinidade que a maioria dos metais apresenta para com o oxigénio.

A atmosfera interactua com o material a sinterizar e dependendo da sua composição e da temperatura de sinterização, essa interacção traduzir-se-á, por uma acção redutora, oxidante, carbonizante, nitrurante ou inerte. É pois de esperar uma grande influência do tipo de atmosfera sobre as propriedades das peças.

Na produção de ligas ferrosas sinterizadas contendo carbono, usam-se, devido ao seu baixo custo, misturas gasosas complexas, resultantes da combustão parcial de combustíveis gasosos, e cuja composição deverá ser ajustada ao teor de carbono na liga.

A composição destas misturas depende dos tipos de hidrocarbonetos presentes no combustível e da razão volumétrica ar/combustível, podendo a sua acção sobre as peças a sinterizar, variar entre oxidante, carbonizante, redutora ou neutra. Quando a razão ar/combustível é elevada (entre 7,5-10) obtém-se o chamado exogás, através de uma combustão (reacção exotérmica). Este gás, quando usado tal e qual, manifesta uma acção oxidante, devido ao elevado teor de vapor de água. Quando convenientemente seco, é constituído principalmente por azoto, monóxido de carbono e dióxido de carbono, pelo que o seu carácter é essencialmente neutro.

Para razões ar/combustível inferiores (cerca de 5-7,5) o gás enriquece em monóxido de carbono e hidrogénio, tornando-se a sua acção ligeiramente redutora. O chamado endogás, obtém-se quando a razão ar/combustível for muito baixa (2 a 3), dando-se neste caso uma reacção endotérmica que necessita de ser activada pela presença de um catalizador.

A mistura gasosa resultante é rica em monóxido de carbono e hidrogénio, pelo que a sua acção é fortemente redutora e carbonizante.

Na sinterização de ferro puro, onde a presença de carbono deva ser evitada, é normal a utilização de atmosferas de hidrogénio electrolítico, ou de misturas de hidrogénio-azoto, resultantes da dissociação catalítica do amoníaco.

A utilização de atmosferas inertes (vácuo, argon, azoto) não é muito vulgar em pulverometalurgia, não só devido ao seu elevado custo, como à possibilidade que as atmosferas redutoras oferecem de reduzir os óxidos que eventualmente se tenham formado à superfície dos pós.

Um gás de elevado efeito nitrurante é o amoníaco pelo que a sua presença na mistura de amoníaco dissociado, deve ser evitada, quando a dissolução do azoto no ferro seja prejudicial.

O quadro VI resume as principais características das atmosferas usadas na sinterização de ligas ferrosas.

A temperatura de sinterização é um parâmetro de extraordinária importância, não só pelo efeito que tem nas propriedades mecânicas das peças sinterizadas, como pela incidência nos custos de produção. Elevadas temperaturas de sinterização acarretam maiores consumos de energia e a utilização de fornos

mais dispendiosos quer no investimento quer nos custos operatórios. A temperatura ideal de sinterização, sob o ponto de vista económico, situa-se abaixo dos 1150° C, limite superior de temperatura de utilização económica dos fornos de banda metálica contínua, aquecidos por elementos resistentes de cromo-níquel. Para temperaturas superiores os fornos são de tipo diferente no que respeita ao sistema de movimentação da carga e aos elementos de aquecimento; usam-se fornos de empurramento, de soleira inclinada, cavalgantes, aquecidos por resistências de molibdénio, grafite, carboneto de silício e dissilicieto de molibdénio. O custo destes fornos é substancialmente mais elevado, apresentam produções menores e exigem, devido aos materiais constituintes das resistências, atmosferas mais puras, em especial, isentas de carbono.

O tempo de sinterização é também um dos factores de custo a considerar, pelo que deverá ser o mais curto possível. Valores médios situam-se entre 30 e 60 minutos.

3.5 — Infiltração

É a operação pela qual os poros abertos (poros interligados e comunicando com a superfície), são preenchidos com outro metal, líquido à temperatura de infiltração.

Com esta operação verifica-se um aumento da densidade da peça, sem se verificarem contracções, melhorando apreciavelmente as propriedades mecânicas e permitindo um efectivo controlo dimensional.

Para que o preenchimento dos poros se torne possível, por capilaridade, o metal infiltrante deverá satisfazer entre outros, os seguintes requisitos: molhar completamente o sólido; não formar, por reacção com este, fases de elevada temperatura de fusão e não dissolver significativamente o metal a infiltrar.

Na produção de peças de ferro sinterizadas, é frequentemente utilizada a infiltração com cobre, em especial entre os produtores americanos, que deste modo usam pressões e temperaturas de sinterização inferiores às dos produtores europeus. Dada a grande solubilidade do ferro no cobre líquido, à temperatura de infiltração (8 a 9 % em peso a 1100-1150° C), não é possível proceder à infiltração directa de cobre puro no ferro, pois provocaria uma apreciável erosão nos poros situados na face exposta ao cobre líquido.

A dificuldade é ultrapassada com a utilização de ligas de infiltração contendo cobre, manganês e ferro. O teor de ferro deve corresponder a valores próximos da saturação à temperatura de infiltração, enquanto o manganês actua como desoxidante, promovendo deste modo uma mais eficiente infiltração.

Outra técnica utilizada consiste na interposição de uma «ponte sinterizada» de composição idêntica

QUADRO VI

Atmosferas de sinterização para ligas ferrosas

Atmosfera	Análise típica	Método de produção	Matérias-primas consumo p/ m³ de gás	Energia consumida p/ m³ de gás	Recomendações e aplicações
Hidrogénio	100 % H_2	electrólise	água destilada 0,85 Kg	5 KWh	Sinterização a alta temperatura. Aços inoxidáveis, ferro puro, etc. Explosivo não tóxico.
Hidrogénio	98 % H_2 2 % $CO+N_2$	Dissociação de hidrocarbonetos	Propano 0,2 Kg vapor de água 2 Kg.	1,3 KWh	Peças de ferro. Explosivo e tóxico.
Amoníaco dissociado	75 % N_2 25 % H_2	Dissociação do amoníaco	0,38 Kg de amoníaco	0,59 KWh	Peças de ferro e ferro-cobre. Explosivo e não tóxico.
Endogás	40 % H_2 20 % CO 1 % CH_4 39 % N_2	Combustão de hidrocarbonetos na presença de catalizadores	0,2 m³ de CH_4 0,5 m³ de ar	0,2 KWh	Fe/C e Fe/Cu/C muito tóxico.
Exogás	8 % H_2 6 % CO 6 % CO_2 80 % N_2	Combustão de hidrocarbonetos com uma razão ar/gás elevada	0,12 m³ de CH_4 0,84 m³ de ar	Nenhuma	Fe e Fe/Cu/C muito barato, muito tóxico.

à peça a infiltrar a qual é primeiramente atravessada pelo cobre líquido, possibilitando, deste modo a saturação com ferro.

3.6 — Cunhagem

Com esta operação pretende-se melhorar as propriedades mecânicas das peças, por deformação a frio, e simultaneamente proceder a um ajuste final das suas dimensões.

Consiste na prensagem da peça a frio, em matrizes idênticas às usadas na compactação de pós, por acção de um sistema de punções móveis. O valor da pressão é ligeiramente superior ao usado na prensagem de pós (cerca de 500 a 700 MN/m^2).

Quando o objectivo principal é o controlo de dimensões a operação é designada por calibragem e efectua-se, em regra, usando pressões inferiores (cerca de 100 MN/m^2).

3.7 — Operações de acabamento

Constituem um conjunto muito diversificado de operações, a maioria das quais, comuns a outras tecnologias de enformação de metais. Pode dizer-se que, com os devidos cuidados, dado tratar-se de corpos porosos, todas as operações de acabamento de peças metálicas, são aplicáveis às peças sinterizadas.

Pelas particularidades que apresentam, convém referir as seguintes operações de acabamento.

3.7.1 — União de peças

Os processos de brazagem e de soldadura com ligas de baixa temperatura de fusão, não são adequados, pelo elevado consumo de material de adição que acarreta a sua penetração nos poros da peça sinterizada.

Mais adequadas são as técnicas de soldadura durante a sinterização, promovida pela adição de uma camada de liga de ferro com elevado teor de fósforo, nas superfícies em contacto. Esta liga funde a baixa temperatura, mas aumenta rapidamente a sua temperatura de fusão por dissolução de ferro, pelo que solidifica ainda durante a operação de sinterização.

Outros métodos de união de peças sinterizadas são a soldadura por pontos moldados nas superfícies a unir, junção mecânica por contracções diferenciais, por parafusos, etc.

3.7.2 — Maquinação

Uma das vantagens da pulverometalurgia e que a torna competitiva com tecnologias alternativas é a de reduzir ou eliminar as operações de maquinação.

Em alguns casos, no entanto, torna-se indispensável proceder a algumas destas operações.

O comportamento das peças sinterizadas de alta densidade, durante a maquinação é semelhante ao das peças maciças. Em peças de elevada porosidade, verifica-se uma menor durabilidade das ferramentas de corte, devido a choques mecânicos nas arestas dos poros. Em qualquer dos casos deve evitar-se a utilização de líquidos arrefecedores pois ficariam retidos nos poros.

3.7.3 — Boleamento de arestas

As peças sinterizadas apresentam, em geral, arestas vivas, por vezes acompanhadas de uma fina rebarba, resultante da folga entre os punções e a matriz. O método mais eficiente de promover um arredondamento destas arestas consiste no rolamento de peças num meio abrasivo. Usam-se para o efeito, tambores, de secção octogonal, onde as peças são roladas juntamente com substâncias abrasivas, tais como, areia, grenalha de aço, alumina, etc. A operação é conduzida em meio húmido de modo a provocar um amortecimento dos choques que poderiam danificar as peças.

3.7.4 — Tratamentos térmicos

É uma operação possível de efectuar, havendo que ter em conta a porosidade das peças e o seu efeito na condutividade térmica dos materiais. Devem evitar-se tratamentos em banhos de sais pois estes ficariam retidos nos poros provocando uma corrosão acelerada.

3.7.5 — Protecção de superfície

Com os devidos cuidados, são adequados todos os tratamentos de superfície utilizados para peças maciças.

Na deposição electrolítica, há que proceder previamente a uma selagem dos poros abertos usando, por exemplo, uma resina epoxi. Deste modo evita-se a retenção do electrólito no interior da peça, que a verificar-se dá origem a fenómenos de corrosão interior.

Para recobrimento de peças com zinco usa-se frequentemente métodos de deposição mecânica (Peen plating), por rolamento das peças no interior de tambores contendo pó de zinco.

A passivação, por oxidação do ferro a óxido negro de ferro (magnetite) é efectuada por acção de vapor de água sobreaquecido.

A utilização de banhos oxidantes deve ser evitada pelos problemas que acarreta a retenção dos sais no interior dos poros.

3.7.6 — Impregnação

Designa-se deste modo uma operação semelhante à infiltração mas em que o líquido infiltrante é um óleo. Usa-se para conferir propriedades autolubrificantes a peças sujeitas a desgaste.

A impregnação é geralmente conduzida sob vácuo e a quente.

4 — LIGAS FERROSAS SINTERIZADAS

As ligas ferrosas representam cerca de 80 % do total de peças estruturais sinterizadas. A este facto não é alheio o baixo custo dos pós de ferro comparado com o de outros metais, as boas características de compressibilidade e sinterabilidade do ferro, e a extensa gama de propriedades possíveis de obter com as ligas ferrosas.

4.1 — Ferro

O ferro sinterizado, sem quaisquer elementos de liga, tem aplicações muito reduzidas, principalmente devido à sua baixa resistência à tracção; as utilizações situam-se em domínios onde a ductilidade ou a permeabilidade magnética do ferro puro, sejam as propriedades determinantes.

No fabrico de polos magnéticos para motores eléctricos, uma das mais importantes aplicações de peças sinterizadas em ferro puro, usa-se pó de ferro electrolítico, devido ao seu elevado grau de pureza e compressibilidade. As temperaturas de sinterização são, em geral, superiores a 1150° C e as atmosferas de amoníaco dissociado ou hidrogénio puro. O valor da permeabilidade magnética, fortemente dependente da porosidade, é em geral inferior nas peças sinterizadas do que nas maciças, pelo que as razões da utilização da via pulverometalúrgica, são, também aqui, de natureza económica.

4.2 — Ligas de ferro

Tal como na metalurgia convencional, o desenvolvimento de ligas de ferro sinterizadas deu-se no sentido de melhorar as propriedades mecânicas intrínsecas dos materiais. Também aqui, o elemento de liga mais económico é o carbono, mas dificuldades relacionadas com o controlo apertado do seu teor nas peças sinterizadas, conduziram ao aparecimento de ligas de ferro-cobre, que não apresentam grande contrapartida nos produtos vazados. Recentemente têm surgido grande número de ligas ferrosas, de baixo teor de elementos de liga, na forma de pós parcialmente ligados, que conduzem a valores elevados das propriedades mecânicas após processamento pulverometalúrgico normal.

A utilização de pós pré-ligados, por conduzirem a dificuldades de prensagem, é, em geral, restrita à produção de ligas contendo elementos com particulares dificuldades de sinterizar (ligas contendo crómio) ou em que a homogeneidade de composição seja um factor determinante (aços rápidos).

4.2.1 — Ligas de ferro-carbono

É essencial que a adição de carbono se faça através da mistura de pós de grafite ou negro de fumo com pó de ferro, promovendo-se a sua dissolução durante a sinterização. Não é viável a utilização de pós ligados, devido à baixa compressibilidade dos pós de aço.

Acresce que a utilização de pós de grafite confere às misturas um apreciável grau de autolubrificação, o que traz inegáveis vantagens durante a prensagem.

As propriedades mecânicas das peças sinterizadas são fortemente dependentes da densidade destas, e, através desta, das características dos pós e do ciclo de produção. Em menor escala as propriedades mecânicas dependem também do teor de carbono dissolvido.

A velocidade de dissolução do carbono no ferro depende da fonte de carbono utilizada, verificando-se que apresenta valores sucessivamente decrescentes quando se utiliza negro de fumo, grafite natural e electrografite.

Tendo em conta a oxidação superficial dos pós de ferro, torna-se necessária a adição de carbono em excesso, para compensar o seu consumo na redução desses óxidos. Tipicamente, para obter um teor de carbono dissolvido de 0,8 %, usa-se cerca de 1,3 % de grafite ou negro de fumo.

A sinterização de ligas de ferro-carbono efectua-se a cerca de 1100° C em fornos providos de atmosferas de endogás ou exogás. A utilização de atmosferas de amoníaco dissociado, além de mais dispendioso, implica o uso de caixas fechadas, onde as peças são recobertas por um pó, mistura de refractário com grafite, de modo a evitar-se a sua descarburação.

4.2.2 — Ligas de ferro-cobre

Tendo começado por ser as ligas ferrosas mais utilizadas na produção de peças sinterizadas, o seu uso continua a ter grande significado, apesar de algum declínio, em particular na Europa. Nos E. U. A. continua ainda a ser a liga ferrosa sinterizada mais produzida.

As ligas de ferro-cobre são produzidas, tanto pela mistura de pós elementares de ferro e cobre, como por infiltração de um corpo poroso de ferro com uma liga de elevado teor de cobre. O elevado interesse das ligas sinterizadas de ferro-cobre deve-se à boa capacidade de endurecimento deste elemento de liga para com o ferro, aliada ao excelente comportamento do cobre durante a prensagem (pó bastante compressível e de elevada resistência em verde), e durante a sinterização (os seus óxidos são facilmente redutíveis, pelas atmosferas dos fornos, e forma uma fase líquida a temperaturas inferiores a 1150° C). A utilização de cobre conduz, no entanto, ao crescimento dos compactados durante a sinterização. Este fenómeno que é explicado pela dissolução do cobre no ferro, pode ser minimizado pela adição de outros elementos que conduzam a uma contracção; dentre os mais utilizados destacam-se o fósforo e a grafite elementos que têm, também, em ambos os casos, efeitos benéficos nas propriedades mecânicas.

A infiltração conduz a materiais com propriedades superiores às obtidas por sinterização da mistura de pós, em particular no que diz respeito ao alongamento e à resistência ao choque. Este facto deve-se à possibilidade de a infiltração conduzir a materiais

praticamente isentos de porosidade. A sua prática é no entanto mais onerosa pelo que é, nalguns casos, preterida pela técnica de mistura.

4.2.3 — Outras ligas de ferro

Desenvolvidas pela Hoganas-Suécia, foram introduzidas no mercado, nos últimos anos, misturas de pós de ferro, reduzidos ou atomizados, contendo diferentes elementos de liga, que trouxeram à pulverometalurgia, importante contributo para um melhoramento das propriedades mecânicas associado a ciclos de produção bastante simples. Para se evitarem fenómenos de segregação dos componentes da mistura e deste modo, melhorar consideravelmente a homogeneidade da distribuição dos elementos de liga, sem as desvantagens inerentes ao uso de pós pré-ligados o caminho seguido foi o de promover, através de um tratamento térmico, em atmosfera redutora, uma soldadura entre as partículas dos elementos de liga e as partículas de ferro. Os elementos de liga usados são o níquel, o cobre e o molibdénio.

No quadro VII, construído a partir de valores dispersos encontrados na literatura, estão indicados os valores médios das propriedades mecânicas de algumas ligas ferrosas comerciais. É evidente, deste quadro, o melhoramento apreciável das propriedades conseguido com a utilização deste tipo de pós (Distalloy SA).

Outro grupo de ligas, também recentemente desenvolvido, incorpora elementos como o fósforo e o enxofre.

O fósforo promove uma mais rápida sinterização e uma acentuada esferoidização dos poros residuais, conduzindo a apreciável melhoramento das propriedades mecânicas em especial da ductilidade. É usado em teores da ordem dos 0,30 a 0,45 %. Surge contudo uma dificuldade com a utilização de fósforo que se relaciona com a apreciável contracção que se verifica, em especial para teores mais elevados deste elemento. Como se disse, a introdução de cobre pode compensar este efeito e simultaneamente, melhorar ainda as propriedades mecânicas. Verifica-se que a mistura contendo 0,30 % de fósforo e 2 % de cobre tem uma variação dimensional praticamente nula, numa extensa gama de densidades (6,4 a 7,0 g/cm³). As propriedades mecânicas médias desta liga encontram-se também indicadas no quadro VII.

O enxofre, que é usado em teores da ordem dos 0,25 % tem o efeito de promover uma selagem prematura dos poros abertos da peça, como é patente da figura 3.

Este efeito é bastante benéfico, quando as peças necessitam de ser sujeitas a operações de acabamento, em especial tratamentos térmicos, maquinação e recobrimentos electrolíticos.

4.2.4 — Aços ligados

Um domínio de muito interesse actual e futuro na pulverometalurgia das ligas de ferro, é o dos aços ligados. Presentemente, são produzidas quantidades

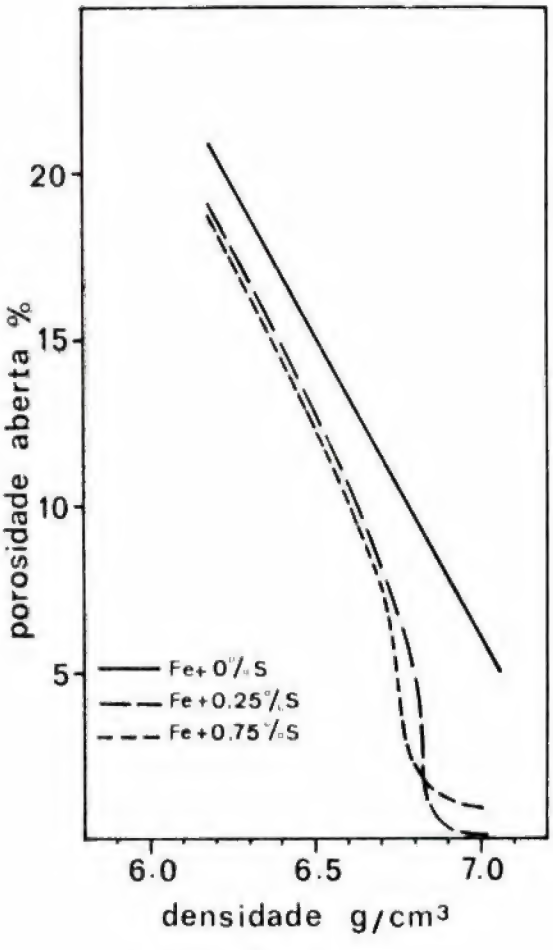


Fig. 3

Efeito da adição de enxofre na porosidade aberta, em corpos sinterizados de ferro

apreciáveis de peças sinterizadas em aços inoxidáveis a partir de pós pré-ligados, e que apresentam, em relação às peças produzidas por via convencional, as vantagens económicas inerentes à utilização da metalurgia dos pós. As propriedades mecânicas, em geral inferiores às das peças maquinadas, são fortemente dependentes das condições de prensagem e sinterização. Usam-se normalmente atmosferas de amoníaco dissociado, ou hidrogénio electrolítico, temperaturas da ordem de 1120° C e tempos de 30 a 60 minutos.

No domínio dos aços rápidos também a pulverometalurgia está a conquistar posições de muito interesse. As vantagens que oferece a sua utilização na produção destes materiais são uma mais efectiva homogeneização da distribuição dos precipitados de carbonetos, conduzindo a um melhoramento apreciável das propriedades mecânicas.

Na produção dos aços rápidos não é utilizável a via normal de prensagem e sinterização que conduziriam à introdução de porosidade, bastante indesejável. Têm sido desenvolvidos diferentes métodos de fabricação, dentre os quais é de salientar o método

QUADRO VII

Propriedades mecânicas de ligas ferrosas sinterizadas

	NC 100.24 (reduzido)			NC 100.24 + 2 % Cu			NC 100.24+2% Cu+0,8% C			Distalloy SA+0,65% C 1,75% Ni+1,5% Cu+0,5% Mo			PNC 30			PNC 30+2% Cu
Densidade	6.5	7.0	7.4	6.5	7.0	7.3	6.5	7.0	7.2	6.7	7.0	7.3	6.5	7.0	7.5	6.8
Tensão de cedência N/mm²	110	130	150	180	220	250	300	360	385	360	380	430	170	230	280	330
Tensão máxima N/mm²	170	220	265	240	310	350	370	500	550	480	590	730	250	350	440	400
Alongamento %	16	18	25	4.5	6.5	9.0	2.1	2.9	3.0	1.8	2.2	3.4	8	12	22	6.8
Dureza HB 2.5/62.5	40	46	68	78	100	115	112	146	170	130	156	180	HV10 79	HV10 100	HV10 134	HV 10 115
Resistência ao choque Kp m/cm²	1.8	4.7	12.5	1.4	4.4	6.8	1.0	2.2	2.8	—	—	—	—	—	—	—

Asea-Stora que, em linhas gerais, comporta as seguintes operações: os pós ligados, obtidos por atomização, apresentando um grau muito elevado de homogeneização, devido à elevada velocidade de arrefecimento de cada partícula, são classificados e introduzidos numa cápsula metálica. Esta depois de convenientemente evacuada e selada, é submetida a uma compressão isostática de cerca de 400 MN/m² e a uma sinterização à temperatura de 1000° C, utilizando-se um forno de indução. A densificação final efectua-se por compressão isostática a quente (pressão 100 MN/m² e temperatura 1000° C).

Obtém-se deste modo, lingotes completamente isentos de porosidade (densidade 8,06 g/cm³) e com uma elevada homogeneidade de distribuição de carbonetos.

5 — CONCLUSÕES

A pulverometalurgia constitui uma interessante tecnologia de enformação de pequenas e médias peças metálicas que conduz a reduções substanciais nos custos de produção. É especialmente adequada à produção de peças sujeitas a esforços mecânicos moderados, de forma complexa que exijam dispendiosas operações de maquinação quando produzidas por via alternativa. A frequente presença de porosidade nas peças sinterizadas é responsável pela redução do valor das propriedades mecânicas destas, sendo em contrapartida benéfica em aplicações que exijam elevada resistência ao desgaste, ocasião em que as peças são impregnadas com materiais lubrificantes. Recentemente com a introdução de novos tipos de pós e o uso de técnicas mais apuradas tem sido significativo o melhoramento das propriedades mecânicas das peças sinterizadas, fazendo prever que a sua utilização se estenda a domínios até há pouco tempo reservados a peças fundidas, forjadas e maquinadas.

Finalmente convém salientar que se trata de uma tecnologia inexistente em Portugal exceptuando a pulverometalurgia do carboneto de tungsténio, o que se deve provavelmente à sua pouca divulgação ao nível dos cursos de Engenharia e a tratar-se de uma tecnologia de produção de grandes séries tornando difícil a colocação dos produtos no mercado nacional. Ao nível mundial as taxas de crescimento deste tipo de indústria têm apresentado valores muito elevados, superiores às verificadas nos outros sectores da indústria metalúrgica.

BIBLIOGRAFIA

I — Livros

W. D. Jones
Fundamental Principles of Powder Metallurgy
Edward Arnold (Publishers) Ltd.
London — 1960

R. L. Sands and
C. R. Shakespeare
Powder Metallurgy, Practice and Applications
Newnes, London — 1967

Höganäs Iron Powder Handbook
Volume 1 — Basic Information on Iron Powder Metallurgy
Höganäs — Billesholms AB. Höganäs, Sweden — 1962

Henry H. Hausner
Handbook of Powder Metallurgy
Chemical Publishing Co, Inc. New York—1963

II — Revistas

Powder Metallurgy
A Publication the Metals Society, Charlton House Terrace
London

Powder Metallurgy International
Published by Verlag Schmid GmbH,
D-78 Freiburg, Germany

Metallurgia and Metal Forming
Official Organ of National Association of Drop Forgers and Stampers
Grove Hill House, 245 Grove Lane,
Handsworth, Birmingham 20
(contém informação dispersa sobre pulverometalurgia).

C. D. U. 621.791:621.311.2

Alguns aspectos da tecnologia de soldadura na construção de equipamentos para produção de energia

SALGADO PRATA *

RESUMO

Trata o tema Construção no que respeita à tecnologia de soldadura, aplicada a equipamentos para centrais térmicas, hidráulicas e nucleares, tal como actualmente se apresenta na empresa em que o autor exerce a sua actividade.

Faz-se um breve inventário dos processos de soldadura utilizados pela empresa na construção de equipamentos de energia.

Indicam-se limitações dos processos de soldadura provenientes do risco de provocarem deterioração durante o fabrico (fissuração a quente, a frio, durante tratamentos térmicos) ou em serviço, por exemplo, ruptura frágil ou corrosão.

Descrevem-se e exemplificam-se algumas técnicas para rodear as limitações mencionadas.

Referem-se alguns ensaios em cujos resultados se baseiam as técnicas adoptadas.

SUMMARY

It deals with the subject construction on what is concerned with welding technology, applied to equipments for thermal, hydraulic and nuclear power plants as now it is presented in the department where the author works.

A brief inventory of the welding processes used by the factory ou the making of energy equipments is done.

Limitations of the welding processes because of the danger of causing deterioration during the making (fissures during thermal treatments) or on usage, for instance, fragile rupture or corrosion are indicated.

Some technics to dodge the above limitations are described and examples are given.

Reference is made to some experiments on which results the adopted thecnics are based.

1 — PROCESSOS DE SOLDADURA UTILIZADOS PELA EMPRESA NA CONSTRUÇÃO DE EQUIPAMENTOS DE ENERGIA

1.1 — Critério geral

Como princípio procura-se utilizar na maior percentagem os processos de maior rentabilidade, ou seja os que conduzem ao preço de custo nínimo de soldadura, compatíveis com a qualidade necessária e suficiente.

Sob o ponto de vista da rentabilidade conviria em princípio que a percentagem de utilização dos processos em cada obra fosse de acordo com a seguinte ordem, decrescente:

soldadura electro-escória
» electro-gás
» por arco submerso
» MIG automatizada
» MIG (semi-automática)
» com electrodo revestido
» TIG automatizada
» TIG

Porém, o grau de aplicação de cada um dos processos citados numa dada obra, depende doutros factores tais como: espessura dos elementos, quantidade de elementos iguais, características do aço, condições de serviço — determinantes das características requeridas para as juntas soldadas —, disponibilidade de equipamentos, de operadores de soldadura qualificados, de consumíveis de soldadura, etc.

* Eng.º Mec I. S. T., Eng.º Sol. ESSA, M. Weld. I,
— Chefe do Serviço Gestão da Qualidade da SOREFAME.

Comunicação apresentada ao Congresso da Ordem dos Engenheiros, Lisboa, Novembro 1977.

1.2 — Exemplos de aplicação

Em corpos de baixa pressão e caixas de escape para turbinas de vapor de centrais nucleares utiliza-se essencialmente a soldadura MIG com fio fluxado, ao baixo e na posição horizontal vertical, soldadura com electrodo revestido, alguma soldadura por arco submerso e alguma soldadura por electro-escória, esta última na ligação de aço laminado a vazado e em juntas em que a espessura é de 50 mm numa fracção de comprimento e de 80 mm na fracção restante.

A soldadura electro-escória, já foi utilizada para efectuar emendas de «brames» forjadas de 300 mm de espessura, destinadas a comportas.

Em alternadores, no que respeita ao rotor utiliza-se o electrodo revestido e arco submerso, ao passo que nas carcassas se utiliza a soldadura MIG e com electrodo revestido.

Em tubagens de aço de baixa liga a passagem de raiz é feita geralmente pelo processo TIG e o enchimento com electrodo ou arco submerso consoante o diâmetro.

Em tubagens de aços de liga utilizam-se os processos electrodo revestido, TIG, MIG, arco submerso ou combinações destes consoante os diâmetros e espessuras.

Em tubagens de aço sem liga utilizam-se os processos MIG, arco submerso, electrodo revestido, combinações destes, oxiacetilénica, consoante os diâmetros e espessuras.

Na soldadura de virolas de forte espessura as primeiras passagens são dadas pelo processo TIG e/ou electrodo revestido, e o enchimento é feito com arco submerso.

Na soldadura de tubos a placas tubulares de permutadores, utiliza-se o processo TIG automatizado, electrodo revestido ou TIG (manual).

Quando é necessário emendar tirantes de pequenos permutadores, a soldadura topo a topo é feita pelo processo «butt-flash welding».

Na aplicação de revestimentos anti-corrosivos destinados a condensadores que trabalhem com água salgada, a execução do revestimento faz-se utilizando como fonte de calor o electrodo de carbono, ou pelo processo MIG.

Para aplicar outros revestimentos quer de aços macios quer de aços de liga, utilizam-se os processos MIG, arco-submerso com fio, arco-submerso com banda («strip cladding»).

Na soldadura de condutas pode executar-se, em certos casos, cerca de 80 % da soldadura pelo processo electro-gás.

Na soldadura de pré-distribuidores de turbinas hidráulicas, de grandes dimensões convém fazer cerca de 80 % da soldadura com o processo MIG, 15 % com electrodo revestido e 5 % com arco submerso.

2 — LIMITAÇÕES DE PROCESSOS DE SOLDADURA NA APLICAÇÃO A EQUIPAMENTOS DE ENERGIA

2.1 — Consequências de elevada entrega térmica

Os processos de elevada entrega térmica («heat input») como a soldadura por electro-escória, soldadura electro-gás e a própria soldadura por arco submerso (esta última quando aplicada com elevada intensidade e baixa velocidade), têm condicionamentos impostos, por exemplo, pelas condições de serviço a que as obras irão ser sujeitas e/ou pelas características dos aços utilizados. Assim, devido à coalecência de grão e alteração de estrutura na zona afectada pelo calor (ZAC), pode aí verificar-se uma redução da resiliência (dum modo mais geral da tenacidade à fractura) incompatível com as condições de serviço que podem levar a impor, por exemplo, para distribuidores e pré-distribuidores de turbinas hidráulicas, valores mínimos de 6 Kgm/cm^2 (Charpy V) a $-20°$ C. Para igual entrega térmica a deterioração da resiliência depende da composição química do aço, nomeadamente do teor de C e do doseamento de N, Al, Nb, V entre si e em relação ao C. Nem sempre todos estes elementos figuram na composição química constante nos certificados fornecidos com o aço. Mas mesmo quando figuram, o processo seguro para avaliar a deterioração da ZAC, consiste em ensaiar o efeito da entrega térmica prevista para a execução, ou melhor ainda, ensaiar os efeitos de diversos valores da entrega térmica e determinar o valor limite ao qual ainda corresponde um valor aceitável para a resiliência. Pode-se assim chegar à conclusão que o processo electro-escória não é aplicável ao caso em vista sem que seja feito um tratamento posterior de normalização, ou que o processo electro-gás terá de ser aplicado em mais do que uma passagem ou ainda que o processo por arco submerso terá de ser aplicado com um mínimo de n passagens, cada uma delas não excedendo o valor limite da entrega térmica.

Certos aços microligados temperados e revenidos, de baixo teor em C, baixo carbono equivalente, excelente soldabilidade no que respeita à fissuração a frio (não necessitam de pré-aquecimentos ou necessitam apenas, para as maiores espessuras, de pré-aquecimentos moderados) e boas propriedades mecânicas no estado de recepção, podem ser, com maiores entregas térmicas drasticamente deteriorados no que respeita à resiliência. A deterioração deve-se à elevada coalescência do grão na ZAC.

Note-se que já existem outros aços especialmente elaborados para apresentarem coalescência do grão relativamente limitada. Todavia o interesse da sua utilização é moderado devido a serem mais caros.

Em aços susceptíveis à fissuração durante a fase de subida de temperatura dum tratamento térmico (por exemplo de relaxação de tensões), a entrega térmica também tem de ser limitada. A fissuração deste tipo dá-se quando existem nos limites de grão compostos de baixo ponto de fusão, como

sejam sulfuretos complexos de V, Cr, Mo, ou compostos frágeis, como sejam sejam carbonetos complexos de V, Cr, Mo, que não aguentam as tensões criadas durante o aquecimento pelas heterogeneidades de temperatura nas diversas zonas da obra. Ora na parte da ZAC sujeita às mais altas temperaturas (a parte mais próxima da linha de fusão), podem formar-se os ditos compostos, se os tempos de permanência às temperaturas elevadas forem suficientemente longos. Então haverá que limitar estes tempos de permanência o que equivale a limitar a entrega térmica. Assim, por exemplo, na soldadura de virolas de 20 mm de espessura de aço 15MDV4.05, as entregas térmicas foram limitadas a 20 Kj/cm. Por outro lado, no tratamento correspondente de relaxação de tensões, procurou-se que na gama de temperaturas crítica para a fissuração, a velocidade de subida fosse relativamente elevada (uma solução de compromisso com as maiores espessuras — 200 mm — existentes na mesma obra). Para confirmação foi feita, além da qualificação do processo de soldadura, uma qualificação do tratamento térmico, aproveitando o mesmo conjunto soldado. Para simular a rigidez da obra, aquele conjunto foi fortemente travado tanto durante a execução da soldadura como no tratamento térmico de qualificação. Note-se que as qualificações de processos de soldadura são dum modo geral efectuadas em dispositivos que simulam rigidez da obra; por outro lado as dimensões dos retalhos de chapa, são escolhidas por forma a simularem as condições de arrefecimento na obra.

As elevadas entregas térmicas também conduzem a uma deterioração da resiliência do metal que fundiu, devido a provocarem cristalização mais grosseira e forte diluição (isto é, mistura) com o metal de base. A deterioração provocada pela diluição provém do aumento no metal que fundiu das percentagens de elementos tais como C, P, S, V, Nb, provenientes do metal de base. Isto significa que quando se pretende soldar, em condições de elevada diluição, os teores de C, V, Nb do aço a utilizar terão de ser limitados em conformidade com os níveis de resiliência requeridos.

Por outro lado, por exemplo, para garantir valores aceitáveis de resiliência a — 20° C sem recorrer a tratamentos de normalização, somos levados a compensar o efeito do grão grosseiro de solidificação utilizando consumíveis de soldadura que depositem metais com Ni ou Mo, quer na soldadura por electro-escória quer no arco submerso e ainda, neste último processo, limitar simultaneamente o máximo da entrega térmica ou seja, limitar a quantidade mínima de passagens de soldadura para uma dada espessura.

Na soldadura com arco submerso, as elevadas entregas térmicas podem ainda provocar fissuração a quente no metal que fundiu. A fissuração a quente ocorre no plano central da soldadura e depende da morfologia da solidificação, por sua vez condicionada pela geometria da secção da passagem de soldadura, da composição química do metal que fundiu, do gradiante de temperaturas durante o arrefecimento da soldadura e da rigidez dos elementos a soldar.

No que respeita à composição química, a presença de elevada percentagem de C, S, P, ou duma relação % Mn/% Si desfavorável (no caso de não haver elementos de liga é desejável que esta relação esteja compreendida entre 2,5 e 3,5) favorecem a fissuração a quente. Ora a elevada entrega térmica, aumentando a diluição com o metal de base, aumentando as percentagens de C, S, P e alterando a relação % Mn/% Si no metal que fundiu, favorece a fissuração a quente. Note-se que este mesmo efeito (da elevada diluição) se manifesta nas passagens de raiz, mesmo com entregas térmicas relativamente baixas. Ainda nas passagens de raiz, o risco de fissuração a quente é agravado pela forma da secção da passagem (secção mais alta que larga) que proporciona uma morfologia de solidificação desfavorável. Por isto a fissuração a quente é mais frequente nas passagens de raiz, o que leva a preferir em vários casos (por exemplo, chapas espessas ou aços menos adequados) executar aquelas passagens com soldadura MIG ou com electrodo revestido. Quando se utiliza a soldadura com arco submerso nas passagens de raiz, é por vezes conveniente efectuar previamente um ensaio de fissuração a quente.

Mesmo para certos consumíveis de soldadura MIG e certos electrodos revestidos, antes de serem uitlizados pela primeira vez na empresa, é conveniente efectuarem-se ensaios de fissuração a quente (para além dos ensaios de soldabilidade operatória e metalúrgica feitos por rotina para cada lote de consumível aprovisionado).

Ainda entre os processos de elevada entrega térmica que utilizamos em equipamentos de energia tem interesse referir o processo de revestimento à custa de arco submerso utilizando banda em vez de fio electrodo (processo «strip-cladding»). O processo pode ser utilizado quer para revestir peças planas (por exemplo «peças fixas» para deslizamento de comportas) ou de revolução (por exemplo virolas, fundos copados, hastes de servomotores). Utiliza-se por exemplo para obter revestimentos inoxidáveis como sejam do tipo 13 % Cr e do tipo 18/8. Nestes revestimentos a diluição com o meal de base (geralmente em aço ao C-Mn) prejudica a resistência à corrosão e a resistência à descoesão. Minimiza-se a diluição com uma adequada escolha da voltagem, intensidade e velocidade de execução, o que simultaneamente minimiza a entrega térmica, e ainda com uma adequada escolha do fluxo (que deve ter certas semelhanças com um fluxo para electro-escória, nomeadamente boa electro condutividade). Para além destas precauções, e para contrabalançar os efeitos da diluição que subsiste, utiliza-se geralmente na primeira camada um metal de adição mais rico em elementos de liga do que a composição nominal pretendida (por exemplo, 24/14 na primeira camada e 18/8 nas seguintes). Nas qualificações de processo a resistência à corrosão é avaliada quer indirecta-

mente através da composição química e estrutura metalográfica, determinadas a diversos níveis, quer directamente em ensaios realizados em câmara de nevoeiro salino. A resistência à descoesão é avaliada através de ensaios de dobragem lateral, macrodurezas e microdurezas associadas ao exame metalográfico.

2.2 — Fissuração a frio

No caso dos processos de baixa entrega térmica como seja o electrodo revestido, o MIG com baixas intensidades e mesmo o TIG em certas aplicações (por exemplo, soldadura de tubos a placas tubulares de aços ao C-Mn ou aços de baixa liga), existe o risco de fissuração a frio ou fissuração pelo hidrogénio. Este tipo de fissuração dá-se quando coexistem em grau suficiente os três factores, estrutura temperada, hidrogénio e tensões e não ocorre (pelo menos para aços com menos de 0,25 % C), quando algum ou alguns daqueles factores deixam de existir. O controlo do hidrogénio reveste particular importância, não só através do controlo da limpeza das peças a soldar (óxidos, gorduras, humidade condensada) e da secagem dos electrodos, fios (especialmente fluxados) e fluxos, mas também e principalmente através do controlo do teor de hidrogénio que os electrodos e fios fluxados efectivamente introduzem no metal depositado.

Este teor de hidrogénio é muitas vezes superior ao nominal (isto é, ao que seria de esperar para o tipo de consumível em causa) e deve-se a uma insuficiente secagem na fábrica que deve ser feita a temperaturas da ordem de 450 a 600° C. A água de constituição restante não pode ser retirada nas estufas utilizadas nas metalo-mecânicas, cujas temperaturas de funcionamento não ultrapassam normalmente 350° C.

Assim somos levados a efectuar por vezes ensaios de determinação do teor de hidrogénio em metal depositado, conjuntamente com os outros ensaios de recepção de consumíveis.

O grau de têmpera provocado pela soldadura reduz-se reduzindo a velocidade de arrefecimento após soldadura o que se consegue através dos pré-aquecimentos, e também da protecção de soldadura acabada de executar, com mantas de amianto.

O pré-aquecimento, assim como o isolamento térmico da soldadura após a sua execução, contribuem por outro lado para reduzir o gradiante de temperaturas nas peças, e portanto, para reduzir as tensões residuais criadas pela soldadura.

Compreende-se que a temperatura de pré-aquecimento seja tanto mais elevada quanto mais temperável for o aço, quanto mais «frio» for o processo de soldadura utilizado, (estes dois factores determinam o grau de têmpera obtido após a soldadura), quanto mais hidrogénio o conjunto processo-consumíveis introduziram na soldadura e na ZAC, e quanto mais rígidas forem as peças a soldar (pois então maiores serão as tensões residuais de soldadura). Assim as temperaturas de pré-aquecimento são calculadas a partir da composição química e da espessura do aço a soldar, da entrega térmica associada ao processo e condições de soldadura previstos do teor de hidrogénio que se prevê ser introduzido pelo conjunto processo-consumíveis, da rigidez dos elementos a soldar.

O facto da temperatura de pré-aquecimento aumentar quando aumenta o teor de hidrogénio e/ou a rigidez, corresponde a reduzir um dos factores da fragilização (mais concretamente reduzir o grau de têmpera) quando um ou os dois outros factores aumentam.

Por vezes actuar apenas na temperatura de pré-aquecimento não é suficiente quer por a rigidez ser muito elevada, quer por o aço a soldar ser muito temperável. Nestes casos recorre-se a um pós-aquecimento isto é a uma manutenção da temperatura de pré-aquecimento (ou duma temperatura mais elevada) durante algumas horas após a execução da soldadura. Findo estes período de pós-aquecimento segue-se um arrefecimento lento com os elementos soldados isolados termicamente.

O pós-aquecimento, assim como a manutenção da temperatura de pré-aquecimento entre passagens de soldadura, proporciona tempo e temperatura para que parte do hidrogénio introduzido pela soldadura se escape por difusão. Por outro lado também contribuem para atenuar o gradiante de temperaturas (dado que aumentam a largura da zona aquecida) e, portanto, para reduzir as tensões residuais. O ideal seria que sem deixar arrefecer as soldaduras, a obra fosse introduzida no forno de tratamento de relaxação de tensões (já aquecido à temperatura da peça); na prática não é possível na maioria dos casos seguir tal sequência. Têm pois de se tomar as precauções atrás indicadas para evitar fissuração antes do tratamento térmico.

Assim por exemplo na soldadura de virolas de 40-60 mm de espessura, de aço contendo 2-2,5 % Cr, 1 % Mo, utiliza-se um pré-aquecimento entre 250 e 300° C, temperatura interpassagens 250 a 400° C e pós-aquecimento de 300 a 350° C, durante 2 h., seguido de arrefecimento lento. Por outro lado procura-se efectuar as soldaduras com o mínimo de interrupções, trabalhando por turnos.

Ainda outro exemplo relativo a pré-distribuidores para turbinas de 350 MW. Estes pré-ditsribuidores de aço TTStE 36, têm um diâmetro externo da ordem de 9 m e pesam 205 T; são feitas de chapa de espessuras compreendidas entre 140 e 60 mm. As soldaduras mais críticas são as da ligação das travessas (ou pás fixas) aos aros. As travessas de 140 mm de espessura, passam através de rasgos praticados nos aros, de 80 mm de espessura. As travessas (peças macho) são pré-aquecidas a 200° C e os aros (peças fêmea) pré-aquecidas a 300° C. Após a soldadura é feito um pós aquecimento de 2 h. às mesmas temperaturas que o pré-aquecimento. O dar-se maior aquecimento às peças fêmea tem por objectivo criar após arrefecimento, tensões de compressão

que contrariem parcialmente as tensões de tracção originadas pela contracção da soldadura.

A verificação da suficiência dum dado pré-aquecimento e pós-aquecimento para um dado metal de base, condições de soldadura e rigidez dos elementos a soldar pode fazer-se através de certos ensaios de fissuração a frio. Na empresa utilizam-se um ensaio desenvolvido pelo Welding Institute e o chamado ensaio pela método dos «implantes».

A própria soldadura TIG pode, em certas aplicações, requerer precauções especiais. É o caso das soldaduras de tubos de aço ao carbono a placas tubulares de aço ao C-Mn e de forte espessura (por exemplo, 200 mm) de permutadores de alta pressão; as soldaduras são efectuadas pelo processo TIG automatizado.

Neste caso cada passagem TIG é dada com baixa entrega térmica o que, combinado com a temperabilidade e grande rigidez da placa tubular poderia originar, na ausência de precauções especiais, fissuração a frio. Também devido à diluição com o aço da placa tubular (que provocaria aumento dos teores de C, S e P no metal que fundiu), e devido à grande rigidez da placa tubular, poderia ocorrer fissuração a quente na soldadura. Para reduzir a temperabilidade à superfície da placa tubular e os efeitos prejudiciais da diluição, faz-se um enchimento por soldadura da superfície daquela. O metal depositado por este enchimento deve ter $\% C < 0{,}15$, $\% S < 0{,}025$ e $\% P < 0{,}025$.

2.3 — Resistência à corrosão — um exemplo

No que respeita a revestimentos anti-corrosivos à água salgada, como sejam bronzes de alumínio para certos condensadores, a sua aplicação faz-se utilizando como fonte de calor o arco eléctrico dum electrodo de carbono, vareta do metal de adição e um fluxo decapante. Verificou-se que este processo apresenta, em relação ao que utiliza um arco eléctrico TIG, a vantagem de originar uma estrutura metalográfica mais favorável para resistir à corrosão. Atribuiu-se a diferença à diferente distribuição de temperaturas associada a cada um dos processos citados.

2.4 — Deformações e contracções

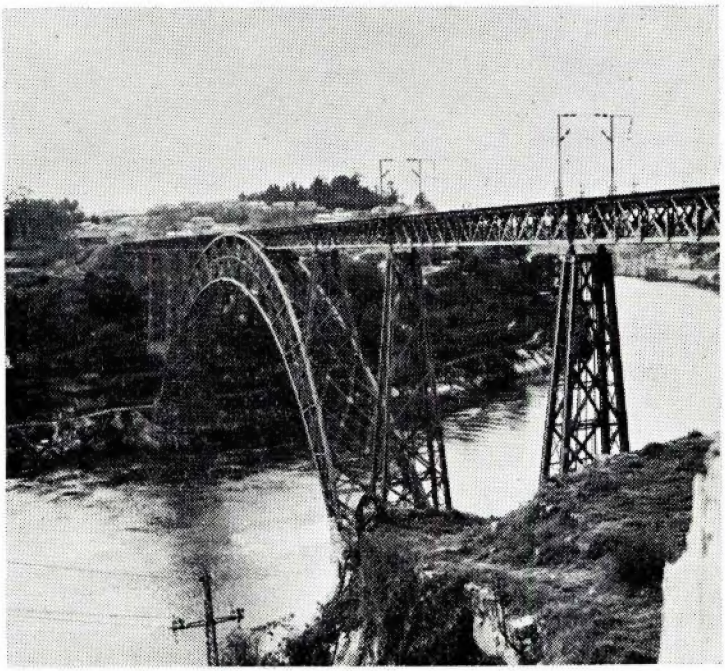
Outro aspecto a que se tem de atender na execução de obras soldadas é o das deformações e contrações provocadas por soldadura. Na verdade o trabalho de desempeno pode representar fracção importante da mão-de-obra total aplicada. Por outro lado as operações de desempeno são de evitar porquanto a sua existência constitui mais um risco de deterioração do material e das juntas soldadas: tem de se admitir a probabilidade de algumas operações de desempeno serem mal executadas.

Ainda no caso de certas obras, como sejam pré-distribuidores de grandes dimensões e fortes espessuras, será muito difícil efectuar os desempenos e pelo menos oneroso corrigir contracções. Há pois que tomar precauções para minimizar a necessidade de desempenos e correcção de contracções. As precauções consistem dum modo geral, em partir de elementos com diâmetros e por vezes também desenvolvimentos (ou dimensões) superiores aos nominais, posicionar os elementos com contraflechas, utilizar sequências de soldadura que compensem as deformações ou minimizem as contracções. Os valores dos acréscimos a dar aos diâmetros ou outras dimensões às contraflechas e as sequências de soldadura a adoptar, baseiam-se na experiência, em ensaios e em cálculos. O cálculo permite prever aproximadamente por exemplo, o valor da contracção angular duma soldadura topo a topo e, portanto, prever a contra-flecha a dar que será de valor igual mas de sinal contrário àquela contracção. O que se disse aplica-se tanto a elementos que após a soldadura se devem apresentar coplanares como àqueles que devam apresentar um certo ângulo entre si. Antes de aplicar o resultado em obra será prudente efectuar um ensaio, até porque certas premissas em que se baseou o cálculo podem não corresponder às condições reais de execução. Por vezes também se aplica o martelamento para reduzir as deformações de soldadura, assim como as tensões residuais.

No respeitante às sequências de soldadura, são estabelecidas caso por caso, em função da geometria dos conjuntos a soldar, assim como das tolerâncias finais requeridas. Há, no entanto, alguns princípios gerais que se podem enumerar como sejam: execução simultânea da soldadura de zonas desfasadas a 90° em conjuntos de revolução, execução simultânea da soldadura de zonas simétricas em relação ao plano dum elemento cujo empeno se pretende evitar, soldadura em passo de peregrino no caso de costuras rectilíneas, etc.

Na prática e no caso de conjuntos complicados, não se consegue uma perfeita compensação dos empenos. Por isso os empenos parciais são medidos ao longo da execução da obra o que permite corrigir a sequência no caso de se encontrarem desvios relativamente ao previsto. Assim quando se trata de mais de um conjunto igual, é geralmente possível no segundo conjunto, obter apenas à custa da sequência de soldadura, uma adequada compensação dos empenos.

No Centenário da Ponte Maria Pia



Anuncia-se:

Lisboa - Porto
Porto - Lisboa

Novos Rápidos "CIDADE INVICTA" e "SETE COLINAS"

Proporcionando: — Viagem em três horas e meia (para já...)
— Serviço especial

Os outros Rápidos mais Rápidos

Novos Directos, Com marchas aceleradas, mas tarifas normais

para breve

Caminhos de Ferro Portugueses

NÚMERO 445/446 DEZEMBRO 1977/JANEIRO 1978 ANO LII/LIII VOLUME XXXIX

C. D. U. 621.785:001.2:669.14

Necessidade de investigação e de desenvolvimento tecnológico em Portugal na área dos tratamentos térmicos dos aços

ANTÓNIO DE PÁDUA LOUREIRO
Prof. Agregado do I. S. T.
Investigador do CEMUL (I. N. I. C.)

RESUMO

Portugal importa a quase totalidade dos aços de tratamento térmico que emprega na indústria. A falta, na maioria das empresas, de instalações de tratamentos térmicos devidamente apetrechadas e de pessoal com os indispensáveis conhecimentos, acarreta a rejeição de muitas peças logo após o tratamento ou a sua curta duração em serviço, causando grandes perdas para o País em divisas e em mão de obra. Por outro lado, a falta de investigação suficiente para resolução dos problemas que a indústria portuguesa defronta, não permite a racionalização dos tipos de aços a importar, impedindo uma decisão fundamentada sobre a eventual criação de uma acearia de aços especiais em Portugal, nem permite a optimização dos tratamentos mais adequados a cada caso.

Na presente comunicação apontam-se os problemas mais importantes nesta área, sugerindo-se seguidamente a criação de uma associação técnica e de uma oficina nacional de tratamentos térmicos dos aços, com vista a incentivar uma progressiva independência tecnológica de Portugal neste campo e a suprir as deficiências em instalações e em pessoal especializado com que lutam muitas empresas que necessitam de efectuar tratamentos térmicos a peças que produzem.

SUMMARY

Portugal imports nearly all the heat treatable steels needed by her industry. The great majority of our factories lack suitable facilities and technical staff with appropriate experience on heat treating steel. This situation leads to the rejection of many parts which were just heat treated or upon a short period under service conditions. Spending in foreign currency and labour costs is thus unavoidable. On the other hand, insufficient research on industrial problems either thus not allow a sensible selection of the steel types which should be imported thus affecting a well based decision on the creation of a special steels industry or reduces the ability to optimization in each case.

In this paper a review is made of the most important problems in this area. Two suggestions are put forward: the creation of a technical association and the sitting up of a steel heat treatment work shop at a national level. In both cases the end results aimed at are: 1) to make our country progressively less technologically dependent on foreign know how and imports; and 2) to give technical support to those firms which have neither appropriate facilities nor sufficiently trained personnel to deal with their heat treatment problems.

1 — OS TRATAMENTOS TÉRMICOS DOS AÇOS E OS SEUS PROBLEMAS

Os tratamentos térmicos dos aços, isto é, a sua sujeição a determinados ciclos de temperaturas, têm em vista modificar a sua estrutura por forma a transformá-la na mais conveniente para que sejam obtidas, tanto quanto possível, as propriedades desejadas em cada caso particular.

Na base das modificações estruturais de maior aplicação nos aços está o facto de o Ferro apresentar, a altas temperaturas, uma forma alotrópica designada por fase gama, de estrutura cristalina cúbica de faces centradas, na qual o Carbono se dissolve intersticialmente em percentagem apreciável, enquanto que,

(1) Comunicação apresentada ao Congresso da Ordem dos Engenheiros, Lisboa, Novembro, 1977.

a baixas temperaturas, a forma alotrópica estável é a designada por fase alfa, de estrutura cristalina cúbica de corpo centrado, em que o Carbono tem solubilidade praticamente nula. As soluções sólidas dos diversos elementos químicos nas fases gama e alfa do Ferro dá-se, respectivamente, os nomes de austenite e de ferrite (designações hoje em dia já utilizadas também para o ferro puro em cada uma dessas formas alotrópicas).

Quando um aço-carbono é levado a temperatura suficientemente alta e mantido a essa temperatura durante tempo suficiente, dar-se-á a modificação estrutural para austenite, ficando o aço formado por microcristais dessa fase nos quais o Carbono se encontra dissolvido; baixando em seguida a temperatura para fora da região de estabilidade da austenite a tendência será a passagem da estrutura a cristais de ferrite com consequente rejeição do Carbono, o qual, habitualmente, aparece sob a forma de carbonetos; se, todavia, a velocidade de arrefecimento até à temperatura ambiente for grande (têmpera), pode não haver tempo para se dar a difusão dos átomos de Carbono, necessária à formação dos carbonetos, e cada cristal (grão) de austenite, abaixo de determinada temperatura M_s (da ordem dos 200° C, dependendo do aço), na sua tendência para formar a ferrite, começa a transformar-se sem difusão, isto é, por uma simples distorção da sua rede cristalina (praticamente instantânea mas em percentagem tanto maior quanto mais se baixar a temperatura), em pequeníssimos cristais de uma fase metaestável designada por martensite, que pode considerar-se como ferrite sobressaturada em Carbono (todo o Carbono que estava dissolvido na austenite mantém-se dissolvido na martensite). A martensite, pela sua estrutura altamente distorcida devido à presença excessiva de Carbono e também pelo tamanho muito pequeno dos seus cristais, apresenta uma dureza muito alta (principalmente dependente do teor de Carbono) que, nomeadamente, aumenta fortemente a resistência à tracção e ao desgaste do aço. Tem, no entanto, o inconveniente de ser frágil, pelo que, habitualmente, após a têmpera para martensite, faz-se um reaquecimento (revenido) a temperatura mais ou menos elevada para permitir a relaxação de tensões e, muitas vezes, uma certa precipitação de carbonetos que amacia em geral a estrutura.

É este o esquema clássico do tratamento térmico de endurecimento dos aços, que se efectua nas peças fabricadas com os aços num estado macio em que mais facilmente podem ser trabalhados. No entanto, com o avanço dos conhecimentos, desenvolveram-se novos processos de tratamento que permitem atingir durezas semelhantes apresentando a estrutura muito menor fragilidade. Assim, verificou-se que a decomposição da austenite em ferrite e carbonetos é fortemente retardada pela presença de certos elementos como o Crómio, o Manganês, etc., dissolvidos na austenite. Os átomos destes elementos, dado terem tamanhos parecidos com os do Ferro, dissolvem-se substitucionalmente, isto é, substituindo átomos de Ferro nos nós da rede cristalina, ao contrário do Carbono (e do Azoto) que se dissolvem intersticialmente. A mobilidade daqueles átomos, necessária para se formarem os respectivos carbonetos, é muito menor que a dos átomos de Carbono. Isto é devido fundamentalmente a, na sua maior parte, o seu movimento ser feito por saltos para nós vizinhos vazios de átomos, isto é, para lacunas, defeitos cuja percentagem nos cristais é pequena (embora cresça exponencialmente com a temperatura), enquanto que o Carbono se move intersticialmente, tendo praticamente sempre na sua vizinhança posições intersticiais vagas quando a agitação térmica lhe comunica impulsos que o leva a saltar de posição. Deste modo, quando um aço contendo tais elementos de liga é austenitizado e seguidamente trazido para temperaturas mais baixas já fora do campo de estabilidade da austenite (mas acima de M_s), verifica-se que só passado um tempo relativamente grande é que se observa o inlcio de precipitação da ferrite e dos carbonetos.

Isto, por um lado, permite endurecer mais profundamente peças relativamente espessas, visto as regiões interiores não poderem, evidentemente, arrefecer tão depressa como à superfície. Demorando mais a transformação da austenite por difusão, é mais fácil agora essas regiões atingirem a temperatura M_s com a estrutura ainda austenítica e portanto em condições de se obter efectivamente a martensite (que, como já se referiu resulta da transformação sem difusão da austenite). Significa isto que a presença daqueles elementos de liga tornou os aços mais temperáveis, permitindo não só endurecer mais profundamente peças que, quando fabricadas de aços-carbono, não endureceriam até regiões tão profundas no mesmo meio arrefecedor, mas também utilizar, para uma mesma profundidade de têmpera, meios arrefecedores menos severos, com a vantagem de atenuar os choques térmicos, diminuindo assim os perigos de distorção e de fissuração.

Mas, por outro lado, o aumento da temperabilidade permite também que as peças a endurecer possam ser arrefecidas em banhos mantidos a temperaturas superiores à de início de formação da martensite, M_s, (de sais fundidos por exemplo), de modo a atingir-se em toda a espessura das peças a temperatura do banho antes de se ter iniciado a transformação da austenite por difusão. Nestas condições, deixando permanecer as peças no banho, mantido a temperatura constante, durante tempo suficiente para se dar a transformação da austenite por difusão (austêmpera), obter-se-ão estruturas uniformes em toda a espessura das peças, formadas por uma mistura muito fina de cristais de ferrite e de carbonetos. Estas estruturas têm durezas parecidas às que se obteriam por têmpera para martensite seguida de revenido, mas a fragilidade vem grandemente diminuída.

Este aumento de resiliência deve-se, por um lado, à grande diminuição do choque térmico, e por outro à transformação da austenite ser lenta (porque envolvendo difusão) e uniforme em toda a espessura